



# TREBALL FINAL DE GRAU



ESCOLA  
POLITÈCNICA SUPERIOR  
UNIVERSITAT DE LLEIDA  
INSPIRING THE FUTURE

**Estudiant:** Arnau Baldomà Armengol

**Titulació:** Grau en Enginyeria Mecànica

**Títol de Treball Final de Grau:**

**Anàlisi de la producció fotovoltaica de la instal·lació UdL Cappont E0**

**Director/a:** Marco Medrano Martorell i Íngrid Martorell Boada

**Presentació**

**Mes:** Setembre

**Any:** 2018

## Índexs de continguts

1.- Introducció. ....	3
2.- Energia solar fotovoltaica.....	4
2.1.- Materials semiconductors i la unió pn.....	4
2.2.- Principi de funcionament de les cèl·lules fotovoltaiques.....	6
3.- Objectius i abast. ....	7
4.- Instal·lació UdL Cappelletti E0. ....	8
4.1.- Característiques de la instal·lació.....	8
4.2.- Producció anual. ....	10
5.- Metodologia. ....	15
5.1.- Model teòric del sistema. ....	15
5.2.- Variables d'estudi.....	16
5.3.- Elecció dels dies representatius.....	20
5.4.- Generació de la base de dades.....	21
6.- Resultats. ....	23
6.1.- Eficiències dels components. ....	23
6.1.1.- Mòdul fotovoltaic.....	23
6.1.2.- Inversor d'ona. ....	25
6.2.- Índexs de producció i coeficient de rendiment.....	28
6.2.1.- Eficàcia del sistema fotovoltaic.....	28
6.2.2.- Influència de la temperatura del mòdul en el sistema. ....	30
6.2.3.- Eficàcia del camp fotovoltaic.....	32
6.2.4.- Influència de la temperatura del mòdul en el mòdul.....	33
6.2.5.- Dissipació de la calor en el mòdul. ....	35
7.- Anàlisi dels resultats i discussió.....	38
8.- Conclusions. ....	44
9.- Bibliografia. ....	45
Annex ....	46

## 1.- Introducció.

El parc fotovoltaic de la Universitat de Lleida està format per cinc instal·lacions connectades a la xarxa, distribuïdes entre els campus de Cappont i de l'Etsea. El parc compta amb una potència total de 390 KW nominals i una superfície total de captació de més de 3.000 m<sup>2</sup> instal·lats sobre les cobertes dels edificis.

Les instal·lacions fotovoltaïques de la Universitat de Lleida, així com altres grans plantes fotovoltaïques, requereixen equips de monitorització que permetin una gestió eficaç del sistema. Alguns dels principals avantatges dels sistemes de monitorització són:

- Detecció de problemes relacionats amb el funcionament de la instal·lació.
- Determinació de les eficiències dels aparells.
- Identificació de les variables que contribueixen en major mesura a la producció fotovoltaica.

El sistema de monitorització del parc universitari han generat una gran base de dades que permetran el control i l'estudi del funcionament de les instal·lacions. En el present treball, ens proposem analitzar el comportament de la instal·lació *UdL Cappont E0*. El nostre estudi es basarà principalment en l'anàlisi dels rendiments de la instal·lació.

A partir de les variables monitoritzades podrem generar els següents paràmetres: coeficient de rendiment de la instal·lació, influència de la temperatura en la potència del sistema, coeficient de rendiment del camp fotovoltaic, influència de la temperatura en la potència del mòdul i la resistència tèrmica equivalent. La relació entre aquest coeficients i la producció anual de la planta ens permetrà justificar els rendiments de la instal·lació. Aquest procés està basat amb la metodologia proposada en el recurs bibliogràfic [7]. En aquest informe, l'Agència Internacional de l'Energia proposa aquesta metodologia per a l'anàlisi de instal·lacions fotovoltaïques, en períodes d'informe d'una setmana. No obstant, nosaltres adaptarem aquesta metodologia, de tal manera que puguem enfocar el nostre estudi cap a un anàlisi anual.

## 2.- Energia solar fotovoltaica.

L'energia solar fotovoltaica és una font d'energia renovable que és capaç de generar energia elèctrica directament a partir de la radiació solar. Aquesta metodologia és possible gràcies a la cèl·lula fotovoltaica. El principi de funcionament de la cèl·lula es basa en l'efecte fotoelèctric.

### 2.1.- Materials semiconductors i la unió pn.

Un semiconductor és un element amb unes propietats elèctriques entre les d'un conductor i les d'un aïllant. Un exemple de material semiconductor n'és el silici, el qual s'utilitza en la majoria d'aplicacions fotovoltaiques. L'àtom de silici constà de 14 electrons que es reparteixen en orbitals al voltant del nucli. En el primer orbital, el més proper al nucli, es situen 2 electrons, en el segon 8 i en el darrer 4. Aquest darrer orbital es coneix com orbital de valència i els seus electrons com electrons de valència.

Quant els àtoms de silici es combinen per formar un sòlid, ho fan en una estructura ordenada anomenada cristall i es mantenen mitjançant enllaços covalents. Cada àtom de silici comparteix els seus electrons de valència amb els àtoms de silici veïns, de tal manera que té 8 electrons en l'orbital de valència.

L'orbital exterior de tots els elements té una predisposició a tenir 8 electrons. Quan no existeixen 8 electrons de forma natural en un element, aquest tendeix a combinar-se i a compartir electrons amb altres àtoms per a obtenir 8 electrons en l'orbital exterior. A causa dels 8 electrons que disposa de manera natural un cristall de silici, aquest resulta un cos compacte i és un aïllant casi perfecte a temperatura ambient (25°C).

Quant la temperatura és major que el zero absolut (-273°C), l'energia tèrmica fa que els àtoms en un cristall de silici vibrin dins del cristall. Les vibracions dels àtoms de silici poden ocasionar que un electró es deslligui de l'orbital de valència. Quan això passa, l'electró guanya la suficient energia per a situar-se en un orbital de nivell energètic superior. A aquest electró es designa electró lliure. La sortida de l'electró deixa un buit que es denomina forat, en l'orbital de valència, i que es comporta com una càrrega positiva.

Els electrons lliures es mouen de manera aleatòria a través del cristall. Ocasionalment, un electró lliure s'aproximarà a un forat, es veurà atret i caurà cap a ell. La unió d'un electró lliure i un forat s'anomena recombinació. Els electrons lliures i els forats reben el nom de portadors, ja que són els encarregats de transportar la càrrega elèctrica.

Un semiconductor intrínsec és un semiconductor pur, com per exemple un cristall format íntegrament per silici. A temperatura ambient, un cristall de silici es comporta

més o menys com un aïllant, ja que només té uns quants electrons lliures i els corresponents forats, produïts per l'energia tèrmica.

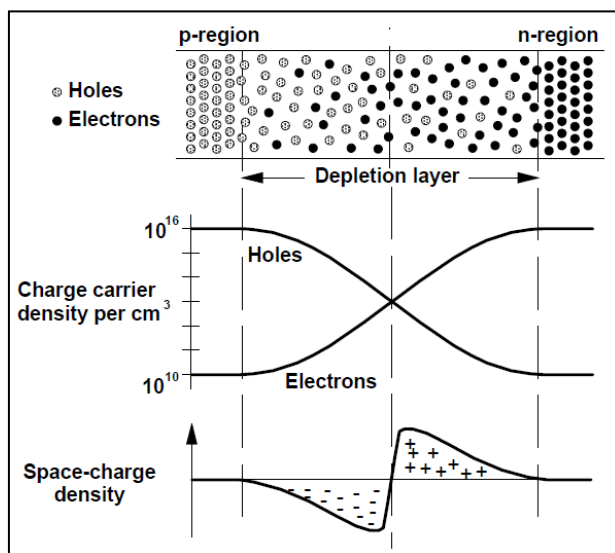
Una manera d'augmentar la conductivitat d'un semiconductor és mitjançant el dopatge. El dopatge suposa que s'afegeixen àtoms d'impureses a un cristall intrínsec per a modificar la seva conductivitat elèctrica. Un semiconductor dopat s'anomena semiconductor extrínsec. Podem distingir dos tipus de semiconductor extrínsecs.

- Semiconductor tipus n: Si dopem un cristall de silici amb àtoms pentavalents (ex. arseni, antimoni, fòsfor), el semiconductor resultant tindrà un excés d'electrons lliures.
- Semiconductor tipus p: Si dopem un cristall de silici amb àtoms trivalents (ex. alumini, bor, gali), el semiconductor resultant tindrà un excés de forats.

Si dopem un cristall de manera que una meitat sigui tipus p i l'altra tipus n, la separació física entre els semiconductors s'anomena unió pn.

Al unir el semiconductor tipus p amb el tipus n, els electrons de la capa n entren instantàniament a la capa p i es recombinen amb els forats de la regió p. A l'establir-se aquests corrents apareixerà una zona en ambdós costats de la unió que es coneix com zona de depleció. En la Figura 2.1, es mostra un esquema amb la formació d'aquesta zona.

**Figura 2.1.** Zona de depleció.



Font: [2] Renewable Energy. Technology, Economics and Environment.

A mesura que el procés de difusió avanci, l'amplada d'aquesta zona anirà augmentant. Cada electró que travessi la zona de depleció generarà un dípol elèctric, ja que quan abandona la zona tipus n forma un ió positiu i quan entra en la zona p genera un ió negatiu. D'aquesta manera, es formarà un camp elèctric a través de la zona de depleció, de la regió p cap a la n. La difusió d'electrons parerà quan el camp elèctric tingui un potencial suficient com per a detenir els electrons que vulguin creuar la unió. Aquesta

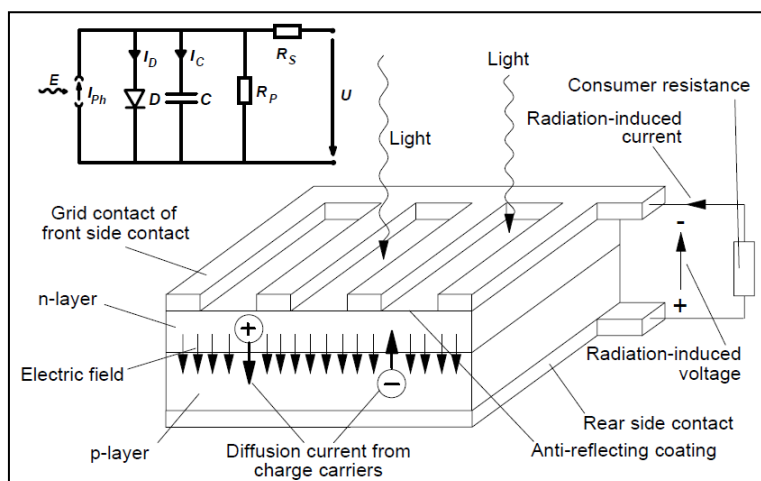
diferència de potencial, en el cas del silici, té un valor de 0,7 V. Aquest camp elèctric només deixarà passar el flux de corrent en una direcció: els electrons podran moure's de la regió o a la n, però no en la direcció oposada i el contrari pels forats, els quals només podran circular de la regió n a la p.

## 2.2.- Principi de funcionament de les cèl·lules fotovoltaïques.

L'efecte fotoelèctric consisteix en l'emissió d'electrons per un material a l'incidir sobre ell una radiació electromagnètica. Llavors, si un fotó penetra dins d'un semiconductor dopat i arribava fins a un electró, el fotó disposarà la seva energia a l'electró i aquest és convertirà en un electró lliure. No obstant, aquest electró ràpidament es recombinarà amb algun forat, i l'energia proporcionada pel fotó es dissiparà en forma de calor. El principi d'una cèl·lula fotovoltaica és obligar als electrons i als forats a desplaçar-se cap als costats oposats del material i, d'aquesta manera, generar una diferència de potencial entre els seus borns.

Per tal d'aconseguir aquesta diferència de potencial, és necessari l'ús de la unió pn, la qual generarà un camp elèctric que permetrà la separació dels portadors de càrrega. Així, quan un fotó arranqui un electró, crearà un electró lliure i un forat, però que mitjançant l'efecte del camp elèctric cadascun anirà en una direcció diferent. D'aquesta manera, en la regió n s'aniran acumulant els electrons i en la regió p els forats, originant dos pols carregats un positivament i l'altre negativament, tal i com es mostra en la Figura 2.2.

**Figura 2.2.** Principi de funcionament d'una cèl·lula fotovoltaica.



Font: [2] Renewable Energy. Technology, Economics and Environment.

### 3.- Objectius i abast.

L'objectiu principal d'aquest Treball de Final de Grau (TFG) és analitzar la producció fotovoltaica de la instal·lació *UdL Capponet E0*. El treball es basarà principalment en l'estudi de l'eficiència energètica que ha presentat la planta entre els anys 2012 i 2017.

El parc fotovoltaic de la Universitat de Lleida disposa d'un sistema de control i monitorització que recull diverses mesures experimentals de la planta. A partir d'aquesta base de dades, podrem generar noves variables que ens permetran valorar el funcionament de la instal·lació. D'aquesta manera, els nostres càlculs estaran basats en valors instantanis i lectures reals de la instal·lació.

A continuació, exposarem els objectius que ens hem marcat de manera més específica.

- Calcular els rendiments dels components principals de la instal·lació.
- Avaluar com han interferit les variables del sistema al rendiment de la instal·lació.
- Valorar si el funcionament de la instal·lació ha estat satisfactori o bé, si s'han presentat ineficiències durant el seu funcionament.

La instal·lació va entrar en funcionament el dia 29 de març del 2011 i els sistemes de monitorització no han parat d'enregistrar mesures fins l'actualitat. Llavors, de tot aquest possible rang de valors, només emprarem el període comprès entre el gener del 2012 fins al desembre del 2017. A més, per reduir l'extensió de dades a analitzar només utilitzarem un dia representatiu de cada mes.

Un altre aspecte que també limitarem seran les variables a estudiar. La base de dades electrònica conté multitud de variables, però en aquest treball només emprarem: la irradiància en el pla dels mòduls, el voltatge i corrent continu a la sortida del *string* fotovoltaic, la potència alterna a la sortida de l'inversor i les temperatures ambient i del mòdul fotovoltaic.

En l'anàlisi de l'eficiència de la instal·lació, en el supòsit de què es presentés alguna deficiència causada per alguna averia, no entrarem a determinar al detall el motiu de la fallida.

## 4.- Instal·lació UdL Cappont E0.

### 4.1.- Característiques de la instal·lació.

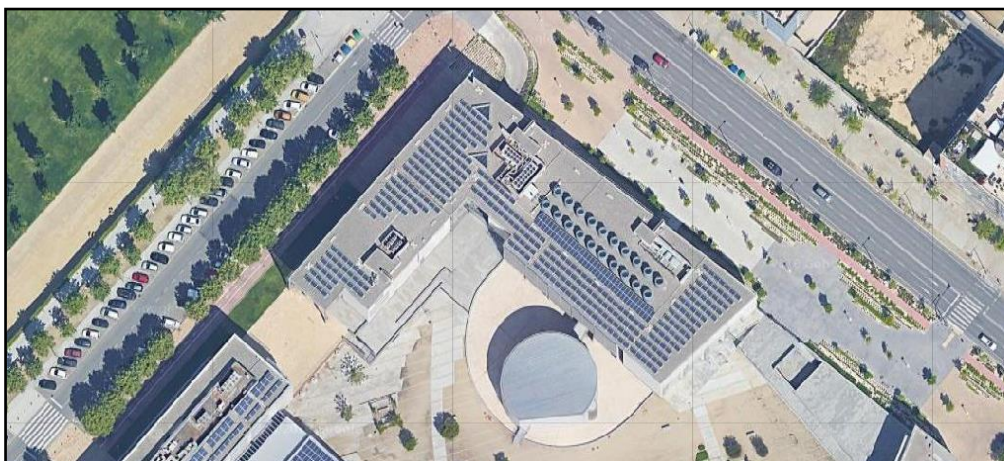
La Universitat de Lleida compta amb cinc instal·lacions solars fotovoltaïques connectades a la xarxa elèctrica, distribuïdes entre els campus de Cappont i el de l'Etsea. El parc compta amb una potència total de 390 kilowatts nominals i una superfície total de captació de més de 3.000 metres quadrats instal·lats sobre les cobertes dels edificis.

Al setembre del 2016, la Universitat de Lleida va iniciar el muntatge d'una nova instal·lació solar situada en la facultat de Ciències de la Salut. En aquest cas, la producció estaria destinada a l'autoconsum energètic, amb l'objectiu de cobrir un 18% del consum de la facultat. La instal·lació estaria formada per 300 plaques fotovoltaïques que generarien uns 70 kilowatts.

En aquest treball, ens centrarem només en una de les instal·lacions del parc universitari, exactament amb la instal·lació *UdL Cappont E0*. A continuació, descriurem la instal·lació i brindarem la informació tècnica dels components i de la planta.

La instal·lació *UdL Cappont E0* es troba situada al campus universitari de Cappont. Les plaques estan muntades sobre el sostre pla del Centre de Cultures i Cooperació Transfronterera, ubicat al carrer Jaume II número 67 de la ciutat de Lleida (25001). La longitud i latitud geogràfica de la planta són 0,6218768 i 41,6072562, respectivament. L'altura sobre el nivell del mar és de 147 metres. La instal·lació va entrar en servei a finals de març de l'any 2011. En la Figura 4.1, es mostra una imatge de la instal·lació.

**Figura 4.1.** Imatge satèl·lit de la instal·lació *UdL Cappont E0*.



Font: *Google Maps*.



En la Taula 4.1 es resumeixen les principals característiques de la instal·lació. No s'ha realitzat cap tipus de modificació en la planta, en aspectes com un augment de potència o canvis en l'orientació o inclinació dels mòduls, des de l'entrada en funcionament fins a l'actualitat. Pel que fa al ancoratge dels panells, estan subjectes mitjançant una estructura metàl·lica, la qual no disposa d'un sistema de seguiment solar.

**Taula 4.1.** *Característiques de la instal·lació UdL Capponet E0.*

Potència nominal (KW):	96,6
Superfície de captació (m <sup>2</sup> ):	683,991
Inclinació (°):	20
Orientació (°):	225
Nombre de panells:	420
Model dels panells:	Atersa A-230P
Nombre de inversors:	6
Model dels inversors:	SMA STP 15.000 TL-10
Connexió en sèrie:	14 / 16
Connexió en paral·lel:	3 / 1

Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

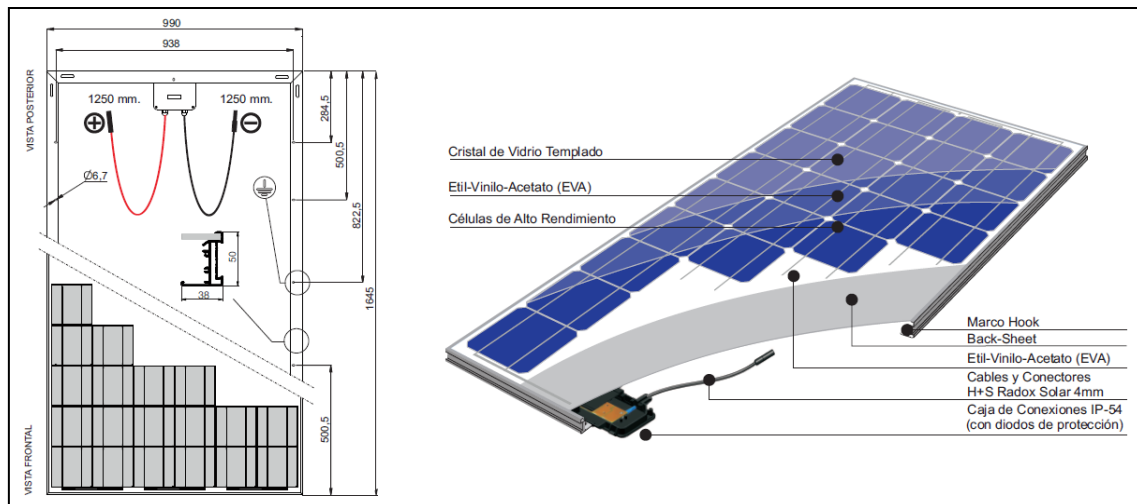
La instal·lació solar està dotada d'un total de 420 mòduls fotovoltaics. En l'annex del treball es pot consultar la fitxa tècnica completa del panell, no obstant, en la Taula 4.2 recollim part de la informació allí recollida. A més, en la Figura 4.2, també és mostra una imatge dels mòduls emprats en la instal·lació.

**Taula 4.2.** *Informació tècnica del panell Atersa A-230P.*

Potència (W):	230
Àrea (m <sup>2</sup> ):	1,63
Massa (Kg):	21,5
Eficiència del mòdul:	14,12 %
Intensitat del punt de màxima potència (A):	7,76
Voltatge del punt de màxima potència (V):	29,65
Intensitat de curtcircuit (A):	8,33
Voltatge de circuit obert (V):	36,83
Coeficient de temperatura de P:	-0,43 %/°C

Font: Atersa. Elaboració pròpia.

**Figura 4.2.** Mòdul fotovoltaic Atersa A-230P.



Font: Atersa

Pel que fa als inversors, la planta disposa de 6 inversors SMA STP15.000 TL-10, dels quals mostrem la informació més destaca en la Taula 4.3. També es pot consultar la fitxa tècnica a l'annex del treball.

**Taula 4.3.** Informació tècnica del inversor SMA STP15.000 TL-10.

Potència contínua màxima a l'entrada (W):	15.340
Voltatge continu màxim a l'entrada (V):	1.000
Voltatge continu mínim a l'entrada (V):	150
Potència nominal a la sortida a 230V i 50Hz (W):	15.000
Voltatge nominal de la xarxa elèctrica (V):	230
Freqüència de potència nominal (Hz):	50
Eficiència màxima:	98,2%

Font: SMA Ibérica. Elaboració pròpia.

## 4.2.- Producció anual.

En aquest apartat, exposarem l'evolució de la producció fotovoltaica de la instal·lació UdL Capponet E0, durant el període comprés entre el 2012 fins al 2017. Les variables que estudiarem seran la irradiació sobre el pla dels mòduls i l'energia generada un cop tractada pel inversor.

La irradiació i l'energia generada són dues variables bàsiques pel control d'instal·lacions fotovoltaïques. A partir d'elles, determinarem el rendiment mitjà anual de la instal·lació, el qual el podem expressar com,

$$\eta_T = \frac{W_{AC}}{H \cdot A} \quad (1)$$

essent,  $\eta_T$  el rendiment mitjà anual de la instal·lació,

$W_{AC}$  l'energia generada per la instal·lació al llarg d'un any (KWh/any),

$H$  la irradiació rebuda en els mòduls durant un any (KWh/m<sup>2</sup>·any),

i  $A$  la superfície de captació solar (m<sup>2</sup>).

Aquest rendiment considerarà totes les pèrdues energètiques al llarg de tot el procés de transformació. Els valors anual d'energia generada, irradiació i rendiment mitjà, es recullen en la Taula 4.4. En la Figura 4.3, també es mostra la representació gràfica de l'energia generada i la irradiació entre el 2012 i el 2017.

**Taula 4.4.** Evolució de la producció anual de la instal·lació UdL Capped E0 entre el 2012 i el 2017.

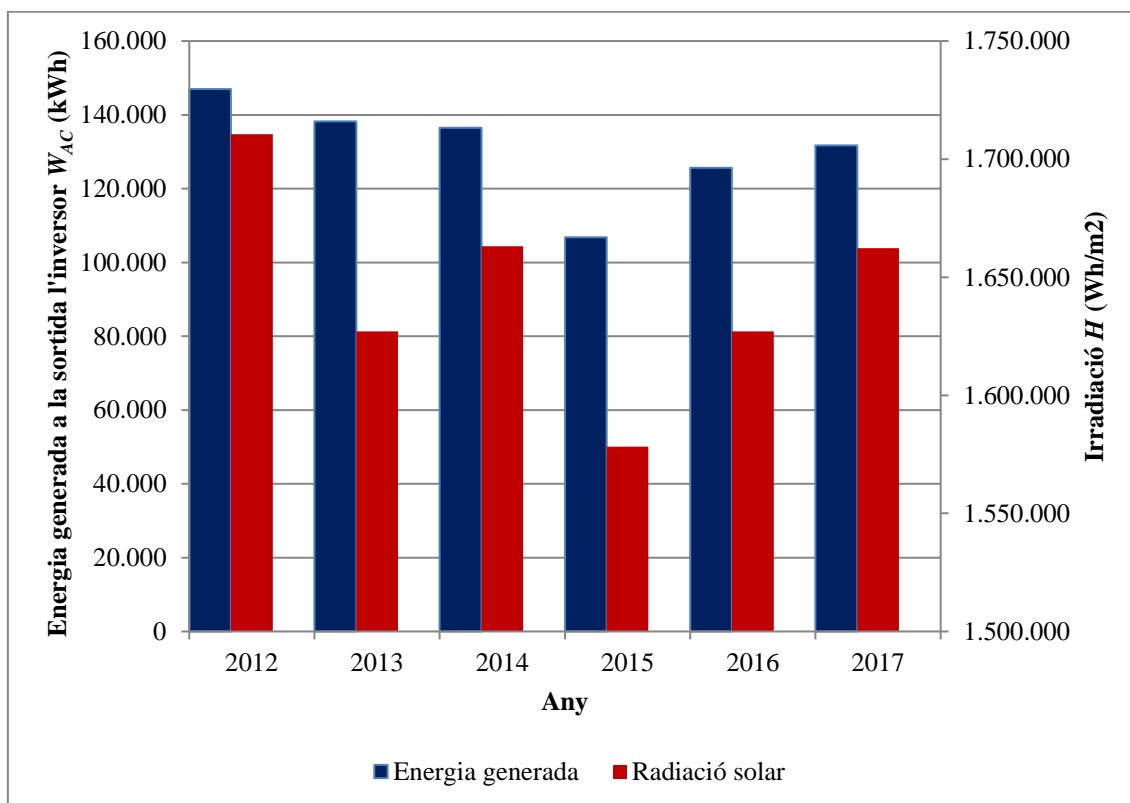
Any	Energia (KWh/any)	Irradiació (Wh/m <sup>2</sup> ·any)	Irradiació (KWh/any)	Rendiment anual
2012	146.975,33	1.710.526,67	1.169.984,85	12,56%
2013	138.216,15	1.627.096,84	1.112.919,59	12,42%
2014	136.458,17	1.663.121,07	1.137.559,84	12,00%
2015	106.854,11	1.578.267,79	1.079.520,96	9,90%
2016	125.614,55	1.627.086,58	1.112.912,58	11,29%
2017	131.745,79	1.662.301,28	1.136.999,11	11,59%

Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

Les dades de l'energia generada mostren una tendència totalment decreixent entre els anys 2012 i 2015. L'any 2012 assolim la màxima producció d'energia amb 146.975,33 KWh, malgrat això, a partir de llavors la producció va minvant fins al 2015, obtenint la mínima de 106.854,11 KWh. L'any 2016, es presenta un punt d'inflexió i l'energia torna a augmentar i segueix aquesta tendència fins al 2017, aportant una energia de 131.745,79 KWh.

A nivell de la irradiació, aquesta no mostra una tendència tant clara com en l'energia generada. Entre el 2012 i el 2015, els nivells de irradiació van oscil·lant any rere any, i és a partir del 2016 quant agafa una tendència ascendent fins al 2017. La màxima irradiació es presenta al 2012 amb 1.710,52 KWh/m<sup>2</sup> i la mínima al 2015 amb 1.578,26 KWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 4.3.** Evolució de la producció anual de la instal·lació UdL Cappont E0 entre el 2012 i el 2017.



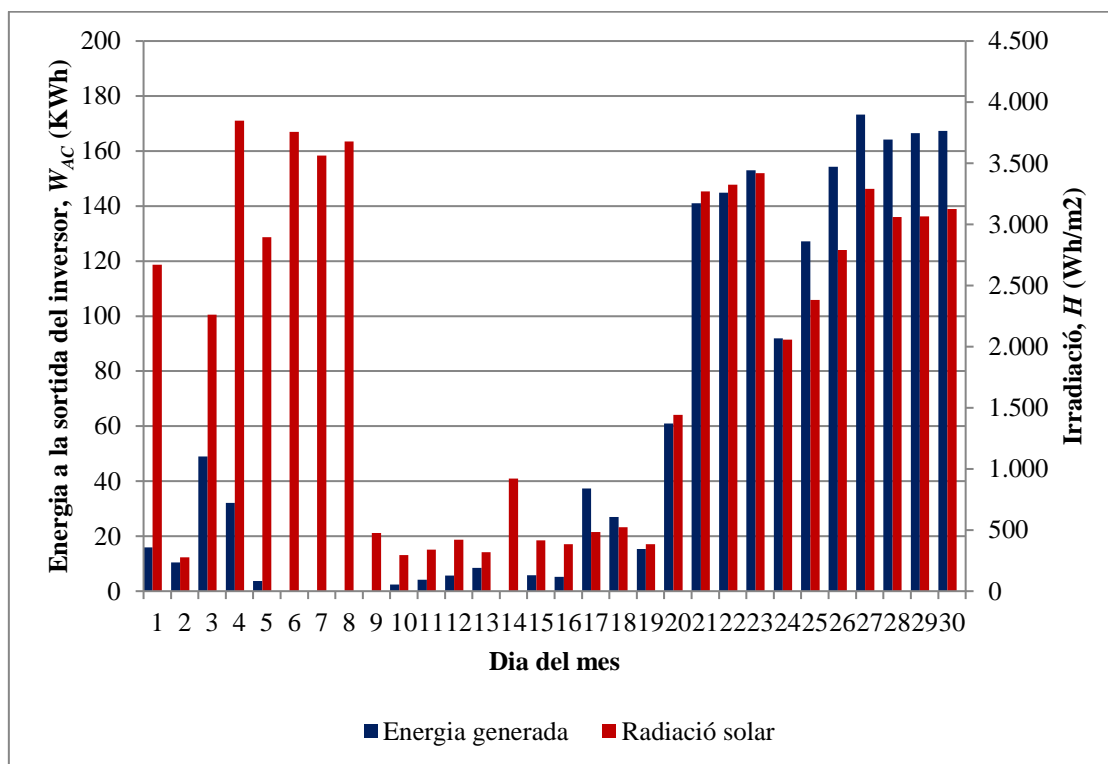
Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

L'evolució de les dades del rendiment total de la instal·lació mostren una tendència totalment decreixent en el interval 2012-2015. La instal·lació parteix d'un rendiment del 12,56% i va descendint fins al 2015, amb un valor de 9,90%. En el 2016, es presenta un canvi cap a una tendència positiva i segueix així fins al 2017, amb un valor d'11,59%.

L'energia generada, la irradiació i el rendiment mitjà anual presenten els seus valors màxims l'any 2012. En canvi, l'any 2015 destaca sobre la resta per obtenir-ne els pitjors, derivant a una baixa producció i eficiència. Però, el mal funcionament de la instal·lació durant aquest any no és casual. La base de dades de la instal·lació mostra diverses incongruències i discontinuïtats en les mesures del 2015, principalment en els

darrers mesos de l'any. A tall d'exemple, en Figura 4.4 podem observar els valors mesurats de l'energia generada i la irradiació durant el mes de novembre del 2015.

**Figura 4.4.** Valors mesurats de l'energia generada i la irradiació en la instal·lació UdL Capponet E0, durant el mes de novembre del 2015.

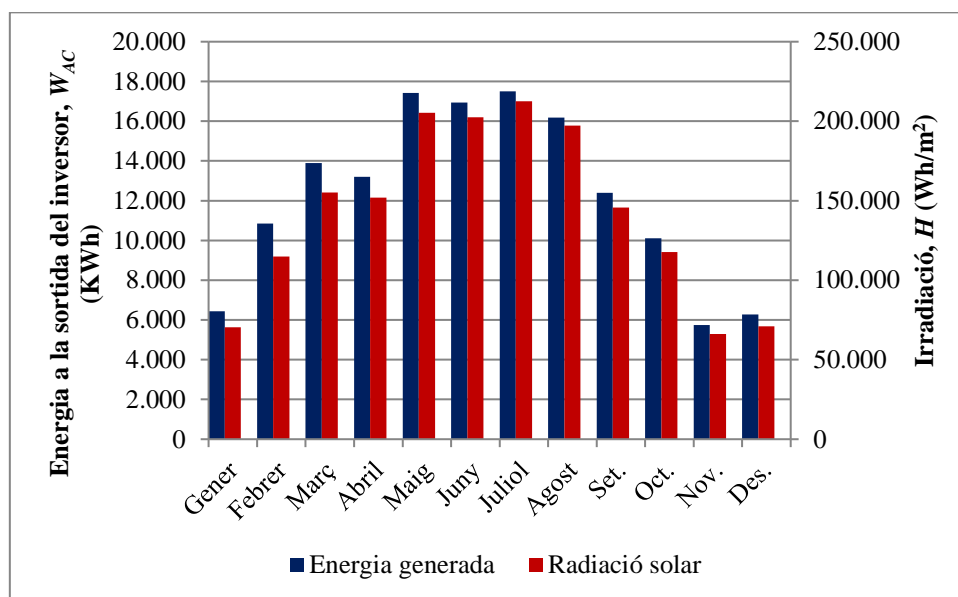


Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

Les lectures dels equips de monitorització no tenen sentit físic en aquest període. No obstant, desconeixem si aquests errors provenen d'una deficiència en els equips de monitorització, o bé d'una possible averia en la instal·lació fotovoltaica. Independentment de la seva causa, caldrà vigilar amb la veracitat dels resultats durant l'any 2015.

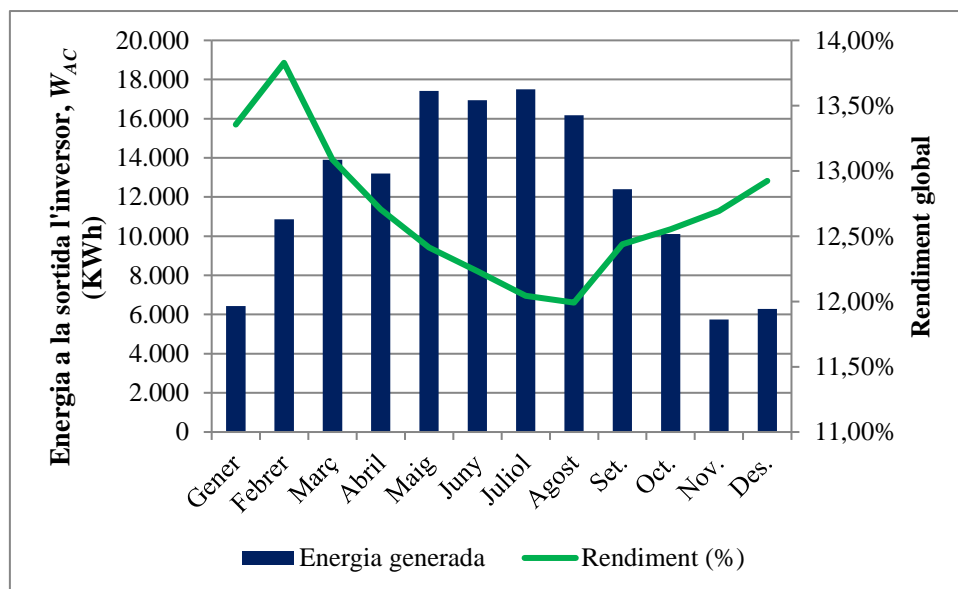
En les Figures 4.5 i 4.6, es presenten els valors mesurats cada mes d'energia generada, de irradiació i el seu rendiment mensual, durant l'any 2012. Durant el mesos més càlids la irradiació és més elevada i la producció d'energia augmenta, però se'n disminueix el seu rendiment. En canvi, en els mesos més freds, la radiació arriba amb menys força, l'energia decreix, però el seu rendiment és més elevat.

**Figura 4.5.** Producció fotovoltaica mensual de la instal·lació UdL Cappellet E0, l'any 2012.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

**Figura 4.6.** Energia generada i rendiment mensual de la instal·lació UdL Cappellet E0, l'any 2012.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

## 5.- Metodologia.

L'objectiu del present apartat és explicar quina ha estat la metodologia seguida en aquest treball fins obtenir la base de dades, a partir de la qual, mitjançant models de primer ordre i regressions lineals, hem determinat els resultats necessaris per a l'anàlisi de la instal·lació.

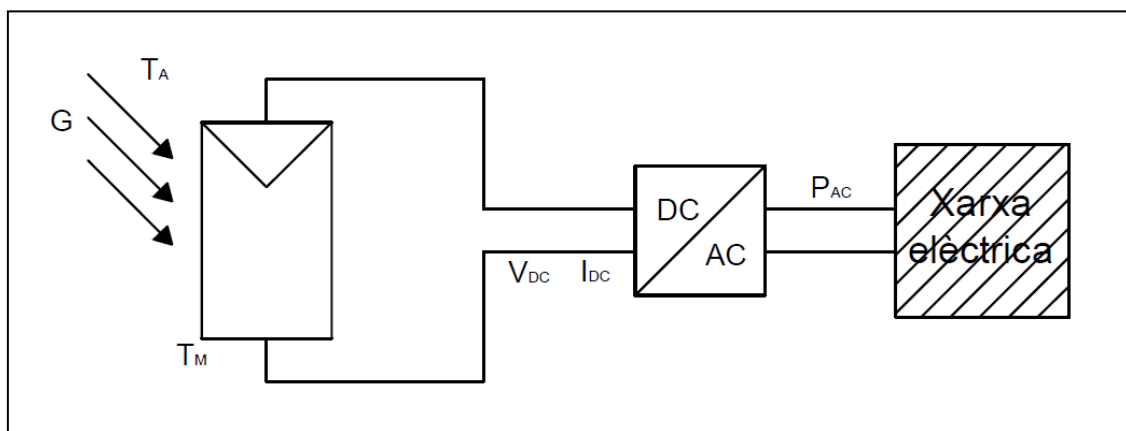
Primer, definirem com hem modelitzat la nostra instal·lació, matisant quines simplificacions hem pres a l'hora d'estudiar el sistema. Després, enumerarem totes les variables que hem utilitzat en el treball; definint quines són les monitoritzades i quines se'n deriven. Al acabar, explicarem quins han estat els nostres criteris a l'hora de seleccionar els dies representatius. I finalment, parlarem sobre com hem estructurat la nostra base de dades.

### 5.1.- Model teòric del sistema.

La instal·lació *UdL Cappellet E0* disposa d'un total de 420 mòduls fotovoltaics i 6 inversors d'ona. Cada inverter està agrupat amb 70 mòduls, els quals estan repartits en quatre ramals; tres dels quals estan formats per 18 mòduls en sèrie cadascun, i el restant per 16. L'inverter de la nostra instal·lació només disposa de dues entrades, per tant, tindrem dues agrupacions de mòduls que conformaran dos *strings* per a cada inverter.

En el nostre treball, a l'hora de facilitar els càlculs, simplifiquem el nostre sistema a una configuració com la que es mostra en la Figura 5.1. Senzillament, agruparem tots els mòduls com si fossin una única unitat, i tota la potència generada per aquests serà també tractada per un únic inverter hipotètic.

**Figura 5.1.** Esquematització simplificada de la instal·lació *UdL Cappellet E0*.



Font: Elaboració pròpia.

Amb aquesta simplificació, podem agrupar tots els valors, per exemple de l'energia a la sortida del mòdul, en un mateix grup; sense haver de diferenciar entre elements de diferents *strings* o inversors. Així, en posteriors apartats, si determinem l'eficiència d'algun aparell, en realitat, estarem calculant una eficiència mitjana de tots els elements que conformen la instal·lació.

Una altra suposició que hem pres ha estat estimar que l'energia a la sortida del camp fotovoltaic és la mateixa que a l'entrada de l'inversor. I que l'energia a la sortida de l'inversor és la mateixa que s'entrega a la xarxa de distribució elèctrica. No obstant, existeixen pèrdues en la transmissió d'energia entre components del sistema, com per exemple, per una caiguda de voltatge a causa de la resistència del cablejat.

Aquesta darrera suposició, possiblement, comporti un petit descens en els valors resultants del rendiment dels components del sistema; ja que aquestos també comptaran amb pèrdues energètiques degudes a altres agents, a part de les pròpies de l'aparell.

## 5.2.- Variables d'estudi.

El parc fotovoltaic de la Universitat de Lleida compta amb un sistema de monitorització, el qual permet el seguiment i control de les diferents instal·lacions. La base de dades és extensa i les variables que mesura són nombroses. No obstant, tal i com hem definit en l'abast del treball, només emprarem part d'aquestes variables.

Les variables monitoritzades que farem servir seran: la irradiància en el pla dels mòduls, el voltatge i el corrent continu a la sortida de cada *string*, la potència alterna a la sortida de l'inversor i les temperatures ambient i la dels mòduls. En la Taula 5.1, es recullen totes aquestes variables, així com la simbologia utilitzada i les seves unitats.

**Taula 5.1.** Variables de la base de dades electrònica de la Universitat de Lleida.

Paràmetre	Símbol	Unitat
Irradiància en el pla dels mòduls	$G$	$KW/m^2$
Voltatge continu a la sortida del <i>string</i> fotovoltaic 'i'	$V_{DC, i}$	$V$
Corrent continu a la sortida del <i>string</i> fotovoltaic 'i'	$I_{DC, i}$	$A$
Potència alterna a la sortida de l'inversor	$P_{AC}$	$KW$
Temperatura ambient	$T_A$	$^{\circ}C$
Temperatura del mòdul	$T_M$	$^{\circ}C$

Font: Elaboració pròpia.



A partir de les variables experimentals recollides en l'anterior taula, generarem unes noves variables i paràmetres, els quals ens permetran valorar el funcionament de la nostra instal·lació. En la Taula 5.2, estan agrupats les variables i paràmetres derivats de les variables de partida. Per a cada ítem, s'especifica la simbologia emprada i les seves unitats.

**Taula 5.2.** Variables derivades.

Paràmetre	Símbol	Unitat
Irradiació en el pla dels mòduls	$H$	$KWh/m^2$
Potència continua generada pel camp fotovoltaic	$P_{DC}$	$KW$
Energia generada a la sortida dels mòduls	$W_{DC}$	$KWh$
Energia generada a la sortida del inversor	$W_{AC}$	$KWh$
Rendiment total de la instal·lació	$\eta_T$	-
Rendiment del camp fotovoltaic	$\eta_{FV}$	-
Rendiment del inversor	$\eta_I$	-
Índex de producció de referència instantani	$y_R$	-
Índex de producció del camp fotovoltaic instantani	$y_A$	-
Índex de producció final instantani	$y_F$	-
Coefficient de rendiment instantani	$pr$	-
Coefficient de rendiment instantani del camp fotovoltaic	$pr_A$	-
Coefficient de la temperatura en la potència del sistema	$\gamma_P$	$^{\circ}C^{-1}$
Coefficient de la temperatura en la potència dels mòduls	$\gamma_{FV}$	$^{\circ}C^{-1}$
Resistència tèrmica equivalent	$k_T$	$^{\circ}C \cdot m^2 / KW$

Font: Elaboració pròpia.

A continuació, descriurem com determinar cadascuna de les variables de la Taula 5.2.

#### Irradiació en el pla dels mòduls:

La irradiació global  $H$  captada al llarg del període de informe  $\tau$  es pot determinar mitjançant la següent equació, i s'expressa en  $KWh/m^2$ .

$$H_{\tau} = \int_{\tau} G(t) \cdot dt = \Delta t \cdot \sum_{\tau} G \quad (2)$$

On  $G$  són els valors mesurats de la irradiància ( $KW/m^2$ ) i  $\Delta t$  és el interval d'enregistrament entre lectures de la irradiància, expressat en hores.

El símbol  $\sum_{\tau}$  designa el sumatori al llarg del període d'informe  $\tau$ .

#### Potència continua generada pel camp fotovoltaic:

La potència generada pel camp fotovoltaic de la instal·lació és pot determinar mitjançant la següent equació. Els valors de potència obtinguts s'expressen en  $KW$ .

$$P_{DC} = \frac{1}{1000} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} V_{DC,i} \cdot I_{DC,i} \quad (3)$$

On  $V_{DC,i}$  i  $I_{DC,i}$  són el voltatge (en V) i la intensitat (en A) de l'*string* fotovoltaic 'i' respectivament, i  $n$  és el nombre d'*strings* fotovoltaics de la instal·lació.

#### Energia generada:

Les energies generades, tant en la sortida del camp fotovoltaic ( $W_{DC}$ ) com en la del inversor ( $W_{AC}$ ), es poden determinar a partir de les seves respectives potències ( $P_{DC}$  i  $P_{AC}$ ) a partir de la següent expressió.

$$W_{j,\tau} = \int_{\tau} P_j(t) \cdot dt = \Delta t \cdot \sum_{\tau} P_j \quad (4)$$

On  $P_j$  són els valors mesurats de la potència (KW) i  $\Delta t$  és el interval d'enregistrament entre lectures de la potència, expressat en hores. Així doncs, l'energia generada s'expressa en KWh.

El símbol  $\sum_{\tau}$  designa el sumatori al llarg del període d'informe  $\tau$ .

#### Rendiment:

Els rendiments de la instal·lació i dels seus components es poden determinar mitjançant les següents expressions. El càlcul del rendiment es realitza de manera clàssica, calculant el rati del flux energètic de sortida entre el d'entrada.

$$\eta_T = \frac{P_{AC}}{G \cdot A} \quad (5)$$

$$\eta_{FV} = \frac{P_{DC}}{G \cdot A} \quad (6)$$

$$\eta_I = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (7)$$

### Índex de producció instantani:

Els índexs de producció es poden determinar a partir de les següents expressions.

- Índex de producció de referència:

$$y_R = \frac{G}{G_{STC}} \quad (8)$$

On  $G_{STC}$  és la irradiància en condicions estàndards de mesura ( $G_{STC}=1 \text{ KW/m}^2$ )

- Índex de producció del camp fotovoltaic:

$$y_A = \frac{P_{DC}}{P_0} \quad (9)$$

On  $P_0$  és la potència nominal de la instal·lació ( $P_0 = 96,6 \text{ KWp}$ )

- Índex de producció final:

$$y_F = \frac{P_{AC}}{P_0} \quad (10)$$

On  $P_0$  és la potència nominal de la instal·lació ( $P_0 = 96,6 \text{ KWp}$ )

### Coefficient de rendiment instantani:

- Coefficient de rendiment global:

$$pr = \frac{y_F}{y_R} \quad (11)$$

- Coefficient de rendiment del camp fotovoltaic

$$pr_A = \frac{y_A}{y_R} \quad (12)$$

### 5.3.- Elecció dels dies representatius.

Un dels propòsits del treball és determinar un seguit de variables i coeficients que ens permetin valorar l'eficiència i l'efectivitat de la instal·lació. A partir d'aquests paràmetres, intentarem justificar la producció anual que ha tingut la planta entre els anys 2012 i 2017.

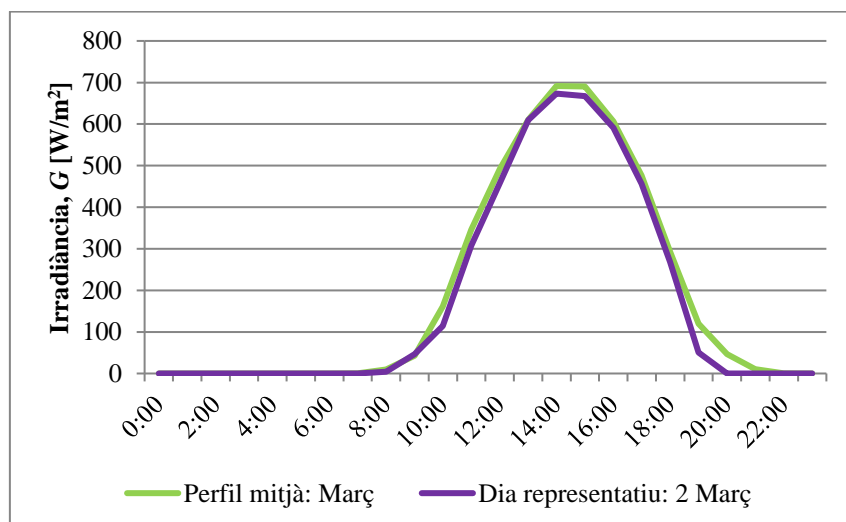
Els càlculs dels coeficients, que emprarem per a valorar el funcionament de la instal·lació, estan basats en valors experimentals instantanis; és a dir, en mesures puntuals al llarg d'un cicle diari, no en mitjanes ni setmanals ni mensuals.

La base de dades electrònica de la Universitat de Lleida disposa, per a totes les variables monitoritzades, tots els cicles diaris des de l'entrada en servei de la planta fins a l'actualitat. La freqüència entre dues lectures consecutives és de 15 minuts. Així, la base de dades està formada per una gran extensió de mesures experimentals.

Les grans dimensions de la base de dades dificulta, en aquest treball, utilitzar tot el rang de mesures disponibles. I és per aquest motiu que només emprarem un únic dia per a cada mes d'estudi.

El nostre criteri per determinar els dies representatius es basa en la irradiància solar. El dia representatiu serà aquell dia del mes en què el seu perfil de la irradiància hora a hora s'ajusti millor al perfil de la irradiància mitjana d'aquell mes. A tall d'exemple, en la Figura 5.2 mostrem el dia representatiu del mes de març. De tots els dies possibles del mes de març, el dia 2 és el dia el perfil del qual millor s'ajusta al perfil mitjà del mes.

**Figura 5.2.** Dia representatiu del mes de març.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

El procediment proposat per a determinar els dies representatius s'exposa a continuació. El primer pas és determinar l'any en què la irradiació rebuda s'acosta més a la mitjana entre els anys 2012 i 2017. En la següent taula (Taula 5.3), es resumeixen els valors d'irradiació anuals i la variació relativa absoluta respecte la mitjana d'aquests anys. L'any que més s'apropa a la mitjana és el 2017.

**Taula 5.3.** Selecció de la irradiació anual mitjana.

Any	Irradiació (KWh)	Variació relativa absoluta
2012	1.710.526,67	4,000%
2013	1.627.096,84	1,072%
2014	1.663.121,07	1,118%
2015	1.578.267,79	4,041%
2016	1.627.086,58	1,073%
2017	1.662.301,28	1,068%

Font: Elaboració pròpia.

El següent pas és aconseguir tots els valors mesurats de la irradiància hora a hora durant l'any 2017; per a tots els dies de l'any. Un cop hem obtingut aquesta informació, calcularem el perfil mitjà de la irradiància per a cada mes. El mètode és senzill, per a cada franja horària en determinarem la mitjana aritmètica; obtenint d'aquesta manera un conjunt de punts de dades que units amb línies suaus conformaran el perfil mitjà d'aquell mes.

Una vegada disposem del perfil mensual, tant sols cal busca quin és el dia del mes que millor s'hi adapta. Per obtenir el millor ajust, calcularem la variància per a cada dia del mes, respecte el perfil mitjà mensual. Llavors, el dia que obtingui els valors de variància mínims serà el dia representatiu.

Finalment, un cop acabat el procés, els dies representatius resultants són: 26 de gener, 10 de febrer, 2 de març, 14 d'abril, 28 de maig, 9 de juny, 30 de juliol, 7 d'agost, 29 de setembre, 17 d'octubre, 21 de novembre i 13 de desembre.

#### 5.4.- Generació de la base de dades.

El darrer punt d'aquesta secció és definir com estructurar la base de dades, la qual ens permetrà el posterior anàlisi de la instal·lació. A l'hora de fer el tractament de dades, el software emprat ha estat un full de càlcul de Microsoft Excel.

La nostra base de dades estarà formada per 72 dies; és a dir, pel dia representatiu de cada mes entre el gener del 2012 fins al desembre del 2017. Els equips de

monitorització de la planta enregistren lectures cada 15 minuts, partint des de les 00:00h fins a les 23:45h. Per tant, cada dia estarà compost per un total de 96 valors experimentals. Així, la nostra base de dades estarà formada per un conjunt superior als 6.500 valors, per cadascuna de les variables d'estudi.

**Figura 5.3.** Mostra parcial de la base de dades elaborada en el treball.

Any	Mes	Hora	Radiació ( $W/m^2$ )	Radiació (KW)	Temperatura mòdul ( $^{\circ}C$ )	Temperatura ambient ( $^{\circ}C$ )
2012	Gener	7:30:00	0,00	0,00	-3,60	-2,90
2012	Gener	7:45:00	0,00	0,00	-3,50	-2,90
2012	Gener	8:00:00	0,00	0,00	-4,20	-3,10
2012	Gener	8:15:00	0,00	0,00	-3,90	-3,10
2012	Gener	8:30:00	1,00	0,68	-4,10	-3,20
2012	Gener	8:45:00	10,00	6,84	-4,00	-3,30
2012	Gener	9:00:00	22,00	15,05	-3,80	-3,00
2012	Gener	9:15:00	36,00	24,62	-3,60	-2,90
2012	Gener	9:30:00	49,00	33,52	-3,10	-2,60
2012	Gener	9:45:00	71,00	48,56	-1,80	-2,20
2012	Gener	10:00:00	91,00	62,24	0,30	-1,70
2012	Gener	10:15:00	102,00	69,77	1,00	-1,10
2012	Gener	10:30:00	120,00	82,08	1,60	-0,70

Font: Elaboració pròpia

A l'hora d'estructurar la base de dades en el full de càlcul hi ha moltes possibilitats, però la nostra proposta és com la que es representa en la Figura 5.3. En aquesta distribució, a cada columna li pertoca una de les variables d'estudi. I en cada fila es representen tots els valors mesurats en aquell mateix instant de temps. Així, amb aquesta senzilla configuració, podem incloure eines de filtratge de dades que permetran treballar amb el rang de dades que ens interressi.

Un cop disposem de la nostra base de dades, ja podrem enfocar-nos cap als càlculs. En el proper apartat, determinarem mitjançant representacions gràfiques i regressions lineals els següents coeficients i paràmetres.

- Eficiència del mòdul fotovoltaic
- Eficiència de l'inversor d'ona
- Coeficient de rendiment de la instal·lació
- Coeficient de la temperatura en la potència del sistema
- Coeficient de rendiment del camp fotovoltaic
- Coeficient de la temperatura en la potència del mòdul fotovoltaic
- Resistència tèrmica equivalent del mòdul

Una vegada acabats els càlculs, relacionarem els nostres resultats amb la producció que ha tingut la instal·lació *UdL Cappont E0* entre el 2012 i el 2017.

## 6.- Resultats.

### 6.1.- Eficiències dels components.

L'objectiu d'aquest apartat és exposar el funcionament dels dos components principals de la nostra instal·lació: el mòdul fotovoltaic i l'inversor. El nostre estudi es centrarà principalment en analitzar les seves eficiències.

Les variables requerides per a l'anàlisi seran la irradiància, la potència contínua a la sortida del camp fotovoltaic i la potència alterna un cop ha estat tractada per l'inversor.

#### 6.1.1.- Mòdul fotovoltaic.

El mòdul fotovoltaic és l'element primordial de la instal·lació; converteix l'energia del Sol en corrent elèctric continu. En una primera aproximació, podem considerar que el funcionament del mòdul fotovoltaic és lineal. D'acord amb aquesta hipòtesi, la potència generada a la sortida del mòdul serà proporcional a la irradiància. La relació entre la potència generada a la sortida del mòdul i la irradiància en el pla del dispositiu ens permetrà determinar el rendiment mitjà de l'aparell.

Si representem en un gràfic la potència generada pel mòdul en funció de la irradiància, podem relacionar aquestes dues variables mitjançant una línia recta que passi per l'origen de coordenades. Aquesta línia es determinarà mitjançant una regressió lineal al llarg de tot el mostreig de dades d'un any. La regressió només contemplarà el valors mesurats durant el funcionament diürn de la instal·lació; és a dir, aquells on la irradiància sigui major que zero. El pendent de la recta aproximarà el rendiment mitjà anual del dispositiu.

Per tant, podem descriure analíticament el funcionament del mòdul com,

$$P_{DC} = \overline{\eta_{FV}} \cdot G \quad (13)$$

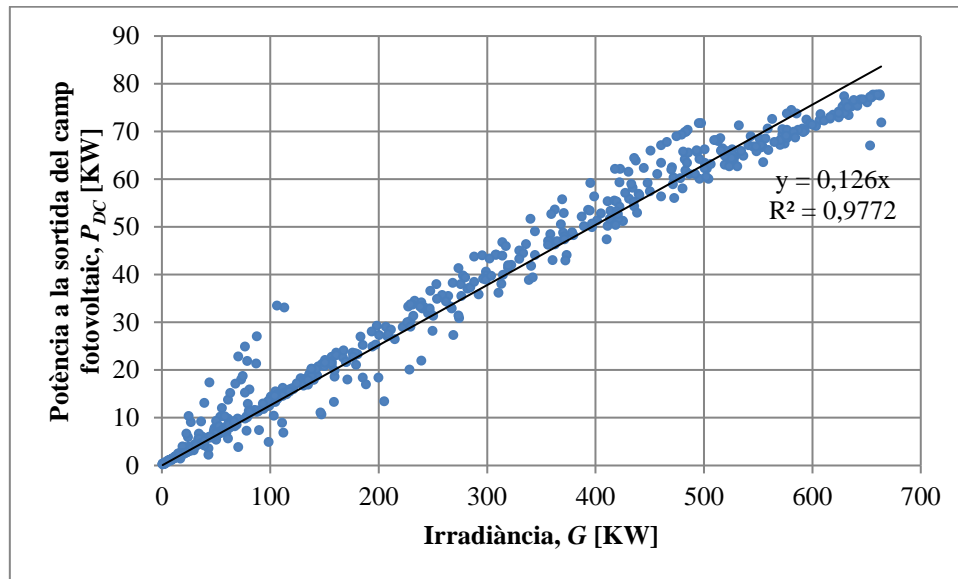
essent,  $P_{DC}$  la potència instantània generada a la sortida del mòdul,

$\overline{\eta_{FV}}$  el rendiment mitjà del dispositiu i

$G$  la irradiància instantània en el pla del mòdul.

En la Figura 6.1 es mostra la representació gràfica de la potència generada pels mòduls i en vers a la irradiància rebuda, per a la instal·lació UdL Cappont E0 durant l'any 2012. A més, també s'ha inclòs la recta de regressió lineal, conjuntament amb la seva equació i el coeficient de determinació de la regressió. Aquest procés s'ha realitzat per a tots els anys d'estudi, dels quals podem consultar els valors resultants en la Taula 6.1.

**Figura 6.1.** Potència generada a la sortida del camp fotovoltaic en funció de la irradiància, l'any 2012 en la instal·lació UdL Cappont E0.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

Si analitzem detalladament la relació entre la potència generada i la irradiància, representada en la Figura 6.1, podem observar que la proporcionalitat entre les dues variables es manté amb una constància notable al llarg de tot el mostreig de dades. No obstant, en el interval entre 0 i 100 KW d'irradiància podem diferenciar una major dispersió de les dades respecte la línia de regressió. Aquest interval de radiació és l'equivalent a la sortida i la posta del Sol. Molt probablement, aquestes variacions en la dispersió guardin relació amb el comportament transitori de la instal·lació, durant el començament i el final de la producció energètica.

A partir dels 100 KW d'irradiància, tenim una gran cohesió dels valors experimentals sobre la recta de regressió. Malgrat això, tal i com anem apropant-nos a valors de major intensitat solar, la dispersió de les dades no mostra tanta uniformitat. El increment de la irradiància va lligat amb un augment també de la temperatura. La majoria d'aquestes pertorbacions a alts nivells de radiació esdevenen a causa de les variacions en la temperatura del mòduls. En posteriors apartats, parlarem de l'afecció de la temperatura a la nostra instal·lació solar.



**Taula 6.1.** Rendiment mitjà del mòdul fotovoltaic de la instal·lació UdL Cappellet E0, entre el 2012 i el 2017, resultats obtinguts mitjançant regressió lineal.

Any	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Rendiment del mòdul</b>	12,60%	12,62%	12,04%	10,73%	11,35%	11,56%
<b>Coefficient de determinació</b>	0,9772	0,9735	0,9784	0,9367	0,9833	0,9670

Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

L'evolució del rendiment del mòdul mostra una tendència decreixent entre els anys 2012 i 2015. A partir de l'any 2016, el rendiment dels mòduls torna a augmentar, i segueix amb aquesta tendència fins al 2017. El rendiment màxim es presenta l'any 2013, amb un valor del 12,62%, en canvi, en el 2015 obtenim el mínim de 10,73%.

Pel que fa als coeficients de determinació, tenim que durant tots els anys el coeficient supera el 93% de cohesió. Per tant, la modelització de primer grau entre la potència generada i la irradiància ha resultat bastant satisfactòria.

#### 6.1.2.- Inversor d'ona.

L'inversor és l'element encarregat de transformar el corrent continu de la instal·lació en corrent altern. En instal·lacions connectades a la xarxa, l'inversor ha de proporcionar un corrent que tingui les mateixes característiques de la xarxa elèctrica a la que està connectada; amb la finalitat d'evitar pertorbacions sobre la xarxa elèctrica de distribució.

De manera similar a l'apartat anterior, podem considerar que el funcionament del inversor és lineal. Per tant, la potència d'entrada serà proporcional a la de sortida. La relació entre ambdues potències ens permetrà determinar el rendiment de l'aparell.

Si representem en un gràfic la potència contínua en funció de l'altern, podem relacionar aquestes dues variables mitjançant una línia recta que passi per l'origen de coordenades. Aquesta línia es determinarà mitjançant una regressió lineal al llarg de tot el mostreig de dades d'un any. La regressió contemplarà el valor mesurat durant el funcionament diürn de la instal·lació. El seu pendent aproximarà el rendiment mitjà anual del dispositiu.

Per tant, podem descriure analíticament el funcionament del inversor com,

$$P_{AC} = \bar{\eta}_I \cdot P_{DC} \quad (14)$$

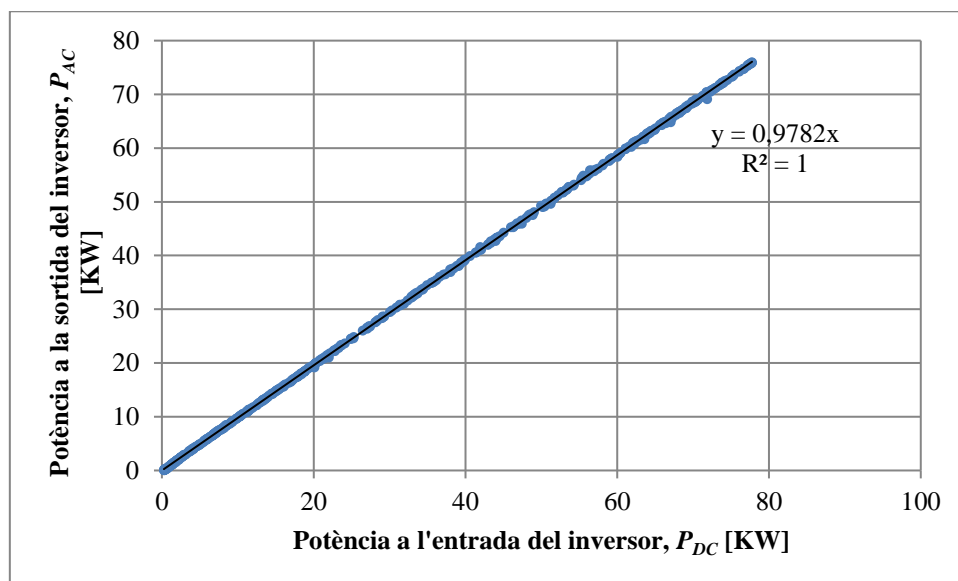
essent,  $P_{AC}$  la potència instantània a la sortida del inversor,

$\bar{\eta}_I$  el rendiment mitjà del dispositiu i

$P_{DC}$  la potència instantània a l'entrada del inversor.

A tall d'exemple, en la Figura 6.2 es mostra la relació gràfica entre la potència d'entrada i la de sortida en l'inversor fotovoltaic, durant l'any 2012. En la Taula 6.2, es resumeixen els valors calculats del rendiment mitjà de l'inversor i el coeficient de determinació de la regressió lineal, durant el interval 2012-2017.

**Figura 6.2.** Relació de potències d'entrada i sortida del inversor de la instal·lació UdL Cappellet E0, l'any 2012.



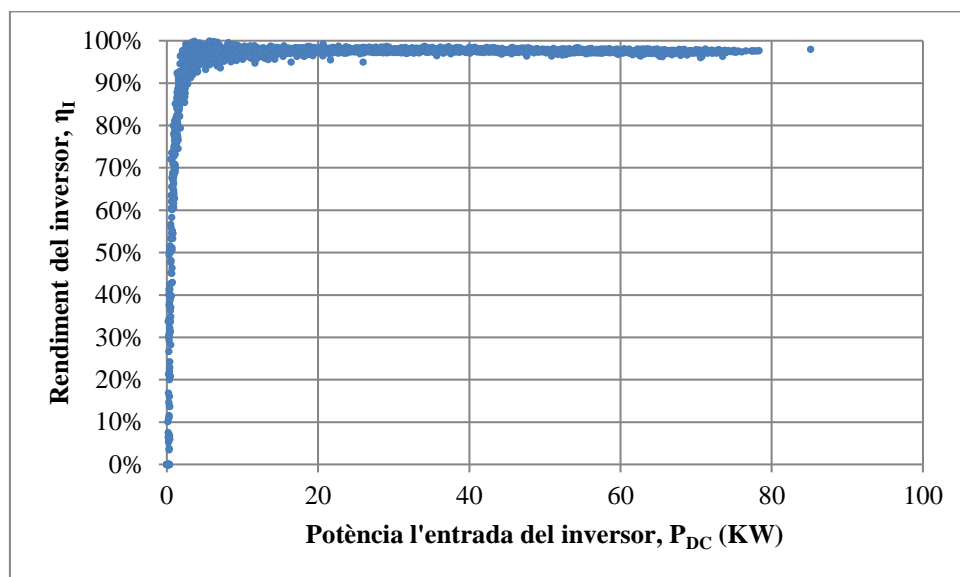
Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

Del gràfic anterior (Figura 6.2), en podem extreure una conclusió important: el dimensionament dels inversors de la instal·lació UdL Cappellet E0 és l'adequat. En algunes instal·lacions, una de les principals pèrdues d'energia es presenta en l'inversor. Si el seu dimensionament no és l'idoni una gran part de l'energia es perd allí. En el cas d'un sobredimensionament, a nivells baixos de irradiància, el rendiment de l'aparell és molt baix. En canvi, si l'estimació de l'inversor ha estat inferior a la que li pertocava, a partir d'alts nivells de radiació, la potència alterna sortiria retallada a la potència

màxima del dispositiu. Tal i com es pot observar en el gràfic, la relació de potències del nostre inversor es manté constant al llarg de tot el mostreig.

Si mirem l'eficiència del inversor sota condicions de baixa intensitat d'irradiància (Figura 6.3), podem observar que la potència alterna a la sortida del dispositiu és menor que la potència contínua d'entrada. Això s'esdevé a causa del consum propi del inversor. Per tant, podem concloure que el dimensionament de l'inversor és correcte.

**Figura 6.3.** Rendiment del inversor en funció de la potència d'entrada.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

D'acord amb els valors de la Taula 6.2, el rendiment mitjà de l'inversor no ha estat mai inferior a un 97% entre el 2012 i el 2017. De fet, les variacions anuals són tant mínimes que podem dir que l'inversor ha tingut un rendiment constant al llarg dels anys.

La hipòtesi del linearitat en el funcionament de l'inversor ha propiciat resultats perfectes. Al llarg de tots els anys, el coeficient de determinació ha resultat valors màxims, amb la qual cosa podem assegurar que el funcionament de l'inversor, en condicions normals de treball, manté un funcionament lineal.

**Taula 6.2.** Rendiment mitjà del inversor de la instal·lació UdL Capponet E0, entre el 2012 i el 2017, resultats obtinguts mitjançant regressió lineal.

Any	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Rendiment del inversor</b>	97,82%	97,90%	97,75%	97,56%	97,35%	97,36%
<b>Coefficient de determinació</b>	1	1	0,9999	1	1	1

Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

## 6.2.- Índexs de producció i coeficient de rendiment.

En aquest apartat, relacionarem variables entre si amb la finalitat de conèixer quina ha estat l'efectivitat de la instal·lació. Tots els càlculs es basen en regressions lineals.

Les variables requerides per als càlculs seran: els índexs de producció instantanis (de referència, del camp fotovoltaic i el final), el coeficient de rendiment instantani i la diferència de temperatures entre el mòdul i l'ambient.

### 6.2.1.- Eficàcia del sistema fotovoltaic.

El coeficient de rendiment (en anglès, *Performance Ratio*) és una de les magnituds més importants per a l'avaluació de l'efectivitat d'una instal·lació fotovoltaica. Aquest coeficient relaciona el rendiment real de la instal·lació amb el seu rendiment teòricament possible.

Tal i com hem pogut veure en apartats anteriors (6.1.1 i 6.1.2), el mòdul fotovoltaic és l'element on tenim major pèrdues d'energia en el procés de transformació, però no és l'únic causant de la distorsió de l'energia. Des de la sortida del camp fotovoltaic fins a l'entrada a la xarxa elèctrica també tenim altres pèrdues, apart de les produïdes per les eficiències dels aparells. Algunes de les pèrdues més típiques podrien ser: per caigudes de voltatge en el cablejat o pèrdues per ombrejat parcial o total d'algunes cèl·lules fotovoltaïques, entre d'altres. D'aquí sorgeix la necessitat del coeficient de rendiment. Aquest paràmetre relaciona la irradiància rebuda amb la potència elèctrica entregada a la xarxa elèctrica. D'aquesta manera, és possible controlar la totalitat de les pèrdues energètiques produïdes en tot el procés de transformació.

Si representem gràficament l'índex de producció instantani final en funció de l'índex de referència instantani, podem relacionar aquestes dues variables mitjançant una línia recta que passi per l'origen de coordenades. A partir d'una regressió lineal, podem determinar la recta que millor s'ajusti a aquesta relació, el pendent de la qual representarà el coeficient de rendiment mitjà de la nostra instal·lació. El rang de dades emprat en cada any és correspon al funcionament diürn de la instal·lació.

Per tant, podem determinar analíticament el coeficient de rendiment com,

$$y_F = \overline{pr} \cdot y_R \quad (15)$$

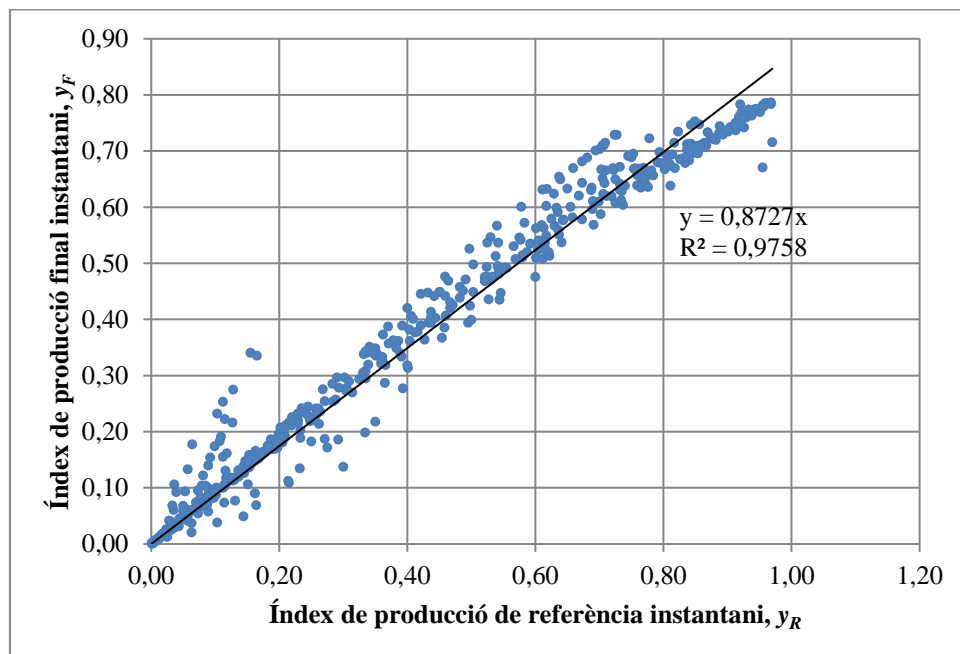
essent,  $y_F$  l'índex de producció final instantani,

$\overline{pr}$  el coeficient de rendiment mitjà i

$y_R$  l'índex de producció de referència instantani.

En la Figura 6.4 és mostra la relació entre l'índex de producció final instantani i l'índex de producció de referència instantani. Els valors representats en el gràfic es corresponen al funcionament diürn de la instal·lació UdL Capped E0, durant l'any 2012. La relació entre aquestes dues variables ens permetrà conèixer el coeficient de rendiment mitjà d'aquest any. Hem repetit aquest procés per a cada any del període 2012-2017, i en mostrem els resultats aconseguits a la Taula 6.3.

**Figura 6.4.** Coeficient de rendiment de la instal·lació UdL Capped E0, l'any 2012.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

El coeficient de rendiment està basat només en dues mesures i pot reflectir tot tipus de incidències durant el funcionament d'un sistema fotovoltaic. No obstant, la dispersió de dades és bastant extensa i si es presenta alguna pertorbació és possible que no aparegui, si no és suficientment significativa.

Segons els valors de la Taula 6.3, el coeficient de rendiment s'ha mantingut constant en els dos primers anys d'estudi, obtenint uns valors que ronden el 87% d'efectivitat. A partir del 2014, el coeficient va minvant fins al 2015, on aconsegueix el seu mínim absolut de 74,07%. En el 2016, la tendència canvia i agafa una trajectòria positiva fins al 2017, acabant amb una efectivitat del 79,7%. El coeficient de determinació mostra valors elevats en tots els anys, tots per sobre del 93%.

**Taula 6.3.** Coeficient de rendiment mitjà de la instal·lació UdL Capponet E0, entre el 2012 i el 2017, resultats obtinguts mitjançant regressió lineal.

Any	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Coeficient de rendiment</b>	87,27%	87,49%	83,30%	74,07%	78,20%	79,70%
<b>Coeficient de determinació</b>	0,9758	0,9722	0,9776	0,9354	0,9830	0,9661

Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

### 6.2.2.- Influència de la temperatura del mòdul en el sistema.

La temperatura del mòdul és el paràmetre més significant que afecta al rendiment del mòdul fotovoltaic. El rendiment de la instal·lació es veu especialment alterat a causa de variacions en la temperatura del mòdul durant el seu funcionament normal.

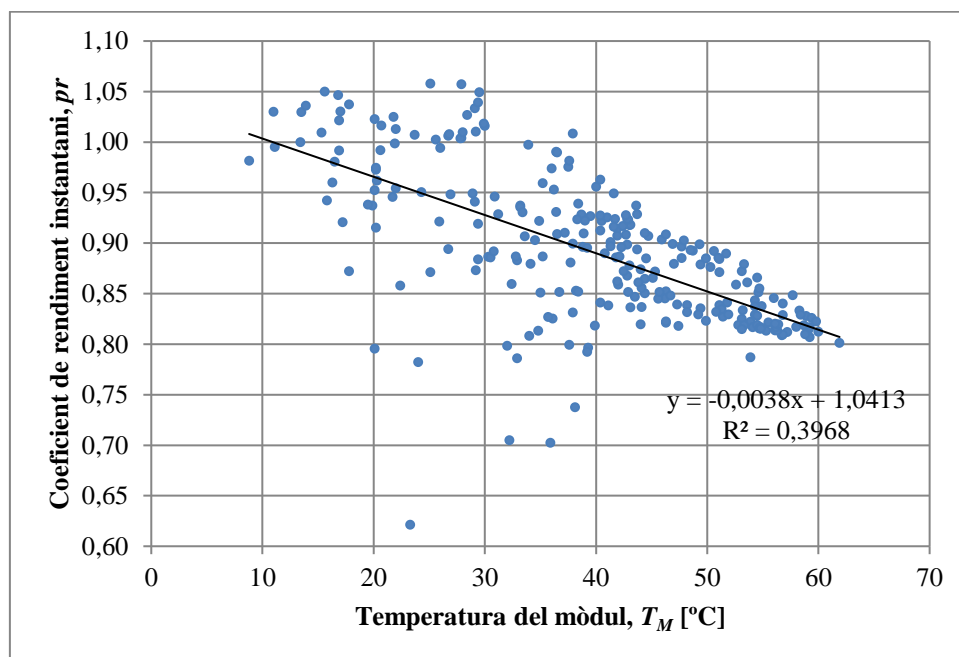
Si representem en un gràfic els valors instantanis del coeficient de rendiment instantani, basats en dades experimentals, en funció de la temperatura del mòdul, la seva relació és pot aproximar mitjançant una línia recta. El pendent d'aquesta recta el podem interpretar com el coeficient mitjà de la temperatura en la potència del sistema  $\gamma$ .

En la pràctica, la hipòtesi de linearitat entre el coeficient de rendiment i la temperatura del mòdul funciona bé amb nivells alts d'irradiància. Per tant, en la regressió lineal s'han omès les mostres mesurades a nivells d'irradiació per sota dels 300 Wh/m<sup>2</sup>.

L'anàlisi està basat amb la potència alterna final, és a dir, un cop ja està tractada per l'inversor d'ona. Per tant, el coeficient de temperatura obtingut també comptarà amb qualsevol efecte tèrmic o pèrdua que tingui lloc en l'inversor.

La Figura 6.5 presenta la representació gràfica entre el coeficient de rendiment instantani i la temperatura del mòdul, per a la instal·lació UdL Cappellet E0 durant l'any 2012. En la Taula 6.4, es resumeixen tots els valors per a cada any d'estudi.

**Figura 6.5.** Coeficient de rendiment de la instal·lació en funció de la temperatura del mòdul, en la instal·lació UdL Cappellet E0, l'any 2012.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

**Taula 6.4.** Coeficient de temperatura en la potència, en la instal·lació UdL Cappellet E0 l'any 2012, resultats obtinguts mitjançant regressió lineal.

Any	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Coeficient de temperatura en la potència (°C<sup>-1</sup>)</b>	-0,0038	-0,0035	-0,0041	0,001	-0,0021	-0,0039
<b>Coeficient de determinació</b>	0,3968	0,1844	0,4691	0,0104	0,1087	0,3462

Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

### 6.2.3.- Eficàcia del camp fotovoltaic.

El coeficient de rendiment del camp fotovoltaic relaciona l'índex de producció de referència amb l'índex de producció del camp fotovoltaic. En una primera aproximació, podem considerar que el funcionament del mòdul fotovoltaic és lineal. D'aquesta manera, podem relacionar aquestes dues variables mitjançant una línia recta que passi per l'origen de coordenades. Aquesta línia es pot determinar mitjançant regressió lineal al llarg del mostreig de dades diürn de tot un any.

Per tant, ho podem descriure analíticament a partir de,

$$y_A = \overline{pr_A} \cdot y_R \quad (16)$$

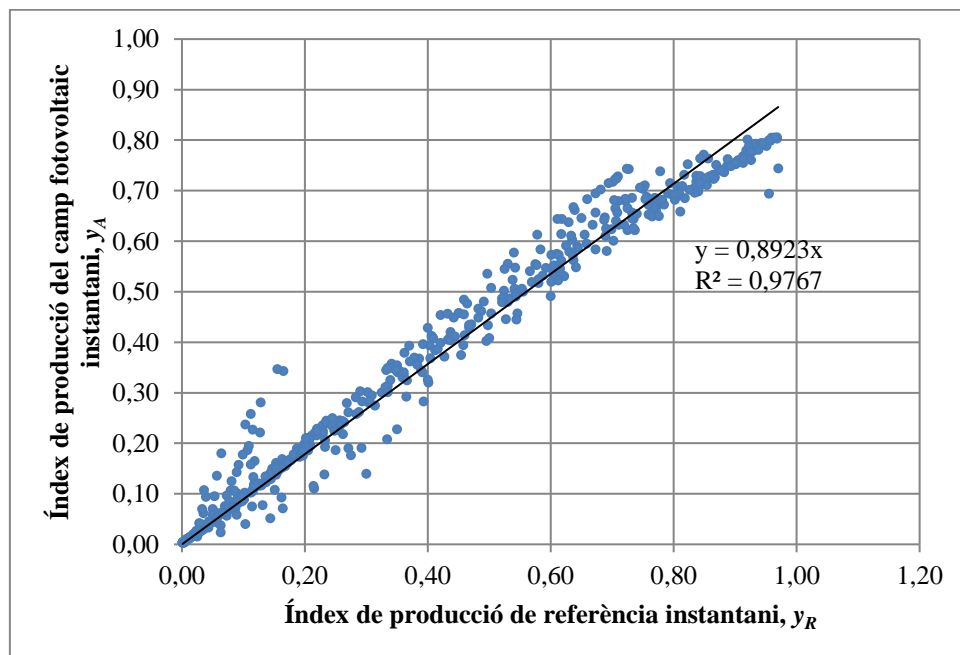
essent,  $y_A$  l'índex de producció instantani del camp fotovoltaic,

$\overline{pr_A}$  el coeficient de rendiment del camp fotovoltaic i

$y_R$  l'índex de producció de referència instantani.

La Figura 6.6 presenta com a exemple la representació gràfica de l'índex de producció del camp fotovoltaic instantani en funció de l'índex de referència instantani. Els valors representats en aquest gràfic, es corresponen a l'any 2012, i només il·lustren les xifres del funcionament diürn de la instal·lació. El pendent de la recta de regressió ens indica el coeficient de rendiment mitjà del camp fotovoltaic durant l'any 2012.

**Figura 6.6.** Coeficient de rendiment del camp fotovoltaic de la instal·lació UdL Capponet E0, l'any 2012.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.



A diferència del coeficient de rendiment, aquest rati només considera les pèrdues energètiques originades en el mòdul. Així doncs, el coeficient de rendiment del camp fotovoltaic ens determinarà quina ha estat l'eficàcia dels mòduls fotovoltaics.

En la següent taula (Taula 6.5), es resumeixen els valors mitjans del coeficient de rendiment del camp fotovoltaic entre els anys 2012 i 2017. Si comparem els resultats obtinguts amb els de la Taula 6.3; és a dir, amb els valors del coeficient de rendiment de tota la instal·lació, podem percebre que les tendències que segueixen els dos coeficients són molt semblants. A més, com és lògic, el coeficient de rendiment del camp fotovoltaic és lleugerament superior al de tota la instal·lació. Òbviament, això es degut a que el coeficient de rendiment conté totes les pèrdues del sistema, en canvi, el coeficient del camp fotovoltaic, només considera les pèrdues fins a la sortida dels mòduls.

**Taula 6.5.** Coeficient de rendiment del mòdul fotovoltaic de la instal·lació UdL Cappelletti E0, l'any 2012, resultats obtinguts mitjançant regressió lineal.

Any	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Coeficient de rendiment del camp fotovoltaic</b>	89,23%	89,38%	85,23%	75,94%	80,33%	81,88%
<b>Coeficient de determinació</b>	0,9767	0,9730	0,9783	0,9363	0,9832	0,9670

Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

#### 6.2.4.- Influència de la temperatura del mòdul en el mòdul.

La temperatura del mòdul és el paràmetre més significant que afecta al rendiment del mòdul fotovoltaic. I és per aquest motiu, que en la majoria de fitxes tècniques dels mòduls s'esmenta el coeficient de temperatura en la potència. Aquest coeficient representa la variació a la que estarà sotmesa la producció elèctrica del mòdul a causa de variacions en la seva temperatura.

En l'apartat 6.2.2, havíem aproximat el coeficient de la temperatura en la potència a partir del coeficient de rendiment de la instal·lació. No obstant, tal i com havíem remarcat, aquest també considerava les pèrdues o fluctuacions en el inversor d'ona.

Si representem gràficament el coeficient de rendiment del camp fotovoltaic en funció de la temperatura del mòdul, podem relacionar aquestes dues magnituds mitjançant una

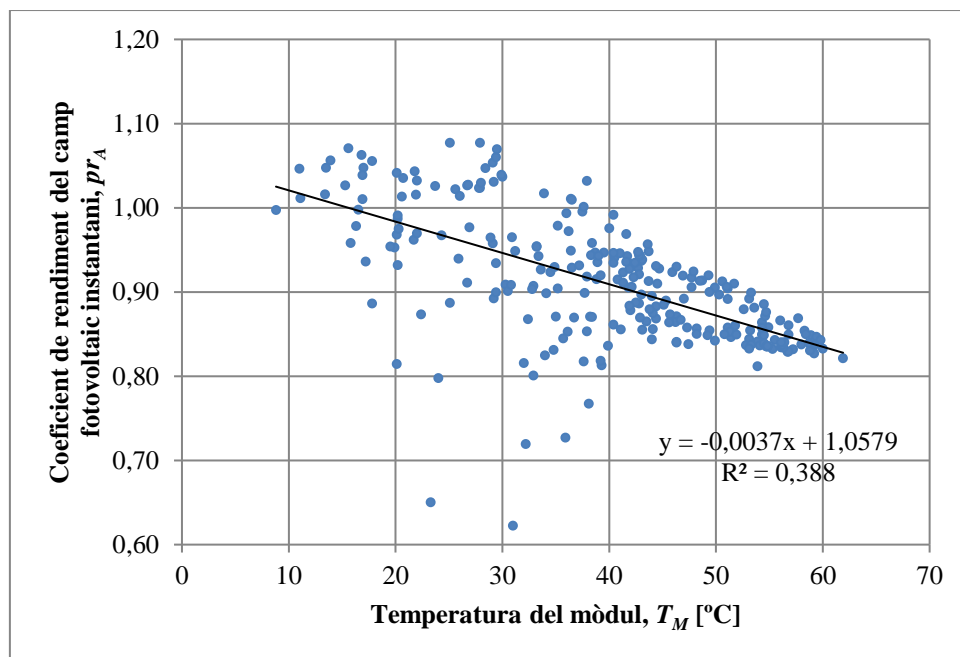
regressió lineal. Podrem interpretar el pendent d'aquesta recta com un coeficient de la temperatura en la potència del camp fotovoltaic.

El coeficient de rendiment del camp fotovoltaic només considera la irradiació sobre el pla dels mòduls i la potència a la sortida dels mòduls, per tant, només tindrem en compte les pèrdues originades en el mòdul. Aquest nou coeficient que determinem en aquest apartat, tindrà un valor més acurat, a diferència del apartat 6.2.2.

En la pràctica, la hipòtesi de linearitat entre el coeficient de rendiment i la temperatura funciona bé amb nivells alts de irradiància. Per tant, en la regressió lineal s'han omès les mostres mesurades a nivells d'irradiació per sota dels 300 Wh/m<sup>2</sup>.

En la Figura 6.7 es representa el coeficient de rendiment del camp fotovoltaic en funció de la temperatura del mòdul. Els valors il·lustrats es corresponen a l'any 2012 en la instal·lació UdL Capped E0.

**Figura 6.7.** Coeficient de rendiment del mòdul en funció de la temperatura del mòdul, en la instal·lació UdL Capped E0, l'any 2012.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

La Taula 6.6 recapitula els valors obtinguts per regressió lineal des del 2012 fins al 2017. Si comparem els valors aconseguits, amb els trobats en la Taula 6.4; és a dir, en el coeficient de temperatura en la potència del sistema, podem veure que aquest dos paràmetres tenen tendències i valors molt similar al llarg dels anys. Aquest fet es degut a que l'inversor no es veu afectat per la temperatura del mòdul.

**Taula 6.6.** Coeficient de temperatura en la potència del mòdul, en la instal·lació UdL Capponet E0, l'any 2012, resultats obtinguts mitjançant regressió lineal.

Any	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Coeficient de temperatura en la potència del mòdul (<math>^{\circ}\text{C}^{-1}</math>)</b>	-0,0037	-0,0034	-0,0041	0,0012	-0,002	-0,0038
<b>Coeficient de determinació</b>	0,388	0,1779	0,455	0,0137	0,0961	0,3298

Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

De manera similar a la Taula 6.4, els valors obtinguts en el coeficient de determinació són bastant baixos, la qual cosa ens informa que és difícil explicar la relació, entre el coeficient de rendiment i la temperatura del mòdul, mitjançant un model lineal.

#### 6.2.5.- Dissipació de la calor en el mòdul.

El rendiment del mòdul és veu principalment afectat per la seva temperatura, per tant és comprensible que la dissipació de calor en el mòdul jugui un paper crucial en el seu funcionament normal.

Si negligim la capacitat d'emmagatzemar calor del mòdul, podem considerar que la calor dissipada serà proporcional a la irradiació rebuda i, també, a la diferència de temperatures entre el mòdul i l'ambient. D'aquesta manera, podem relacionar la diferència de temperatures i l'índex de producció de referència instantani mitjançant una línia recta. Aquesta línia la podem determinar a partir d'una regressió lineal al llarg del mostreig de dades d'un any. El pendent de la recta el podem interpretar com la resistència tèrmica equivalent del mòdul.

Per tant, podem determinar una resistència tèrmica equivalent a partir de la següent expressió,

$$T_M - T_A = \overline{k_T} \cdot y_R \quad (17)$$

essent,  $T_M$  la temperatura del mòdul instantània,

$T_A$  la temperatura ambient instantània,

$\overline{k_T}$  la resistència tèrmica mitja equivalent del mòdul i

$y_R$  l'índex de producció de referència instantani.

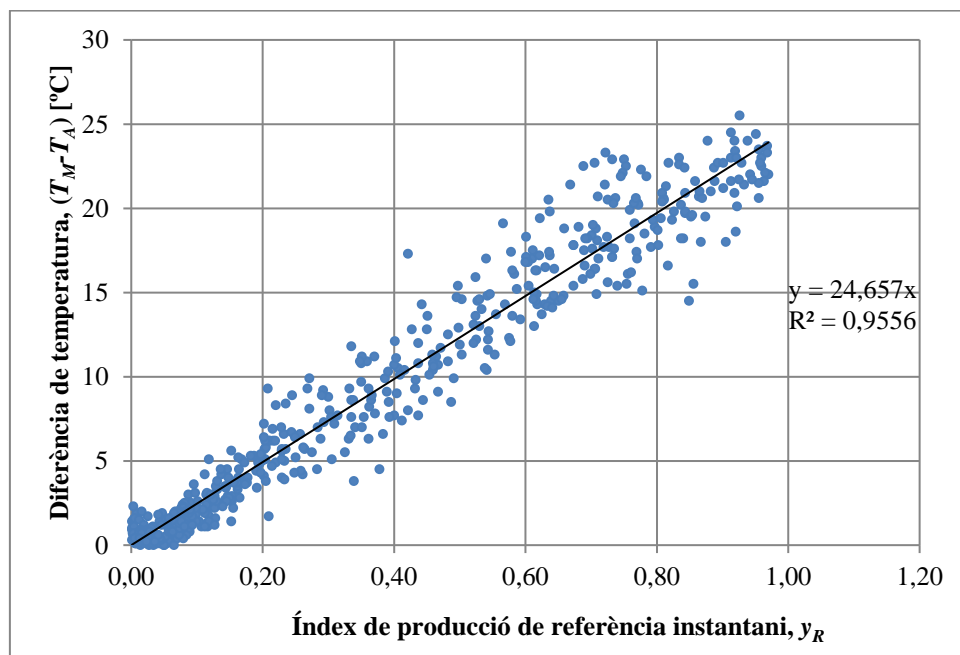
El valor resultant del pendent de la recta de regressió només té unitats de  $^{\circ}\text{C}$ , ja que l'índex de producció de referència és un paràmetre adimensional. Per obtenir les unitats normals d'una resistència tèrmica (en  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{KW}$ ), caldria multiplicar el pendent resultant de la regressió per la irradiància en condicions estàndards de mesura ( $G_{\text{STC}} = 1 \text{ KW}/\text{m}^2$ ). D'aquesta manera, l'anàlisi dimensional de les unitats tindrà coherència.

La Figura 6.8 mostra la representació gràfica de la diferència de les temperatures entre el mòdul i l'ambient en funció de l'índex de producció de referència, en la instal·lació UdL Cappellet E0 l'any 2012. A més, també es mostra la recta de regressió amb la seva equació i el coeficient de determinació.

Si analitzem amb profunditat el gràfic (Figura 6.8), podem fixar-nos que els valors representats mostren força dispersió respecte la línia de regressió, sobretot a valors elevats d'irradiància. Aquest desordre prové de les hipòtesis que hem assumit per a simplificar el nostre sistema i estudiar la resistència tèrmica equivalent.

La resistència tèrmica equivalent calculada no és estrictament la resistència tèrmica del mòdul, però inclou tots els mecanismes de transferència de calor. A més, part de la radiació incident sobre el mòdul es veurà reflectida per la superfície, una altra es convertirà en potència elèctrica i la resta seria l'equivalent a la dissipació de calor.

**Figura 6.8.** Diferència de temperatures en funció del índex de referència, en la instal·lació UdL Cappellet E0, l'any 2012.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

A la següent taula (Taula 6.7), trobem tots els valors de la resistència tèrmica equivalent per a cada any d'estudi. Un canvi significatiu en el pendent ens estaria informant d'un canvi en el rendiment del sistema.

La resistència tèrmica equivalent reflexa amb quina mesura els mòduls fotovoltaics poden conduir la calor i com de ben ventilada es troba la instal·lació. Un augment en aquesta resistència significaria que la instal·lació no està ventilant com abans, això es podria deure, per exemple, a causa d'una acumulació de material i brutícia entre la cara posterior del mòdul i el teulat.

En canvi, un valor inesperadament baix no es deurà a causa d'un refredament excepcional. Normalment, un decreixement important en la resistència tèrmica és causat per un mal funcionament del sensor de temperatura. Per exemple, si el sensor sofreix problemes d'ombregat.

***Taula 6.7. Resistència tèrmica equivalent dels mòduls, en la instal·lació UdL Capponet E0 l'any 2012, resultats obtinguts mitjançant regressió lineal.***

<b>Any</b>	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Resistència tèrmica equivalent (<math>^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{KW}</math>)</b>	24,657	22,870	24,114	24,294	24,206	25,974
<b>Coefficient de determinació</b>	0,9556	0,8897	0,9157	0,9144	0,9439	0,9264

Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

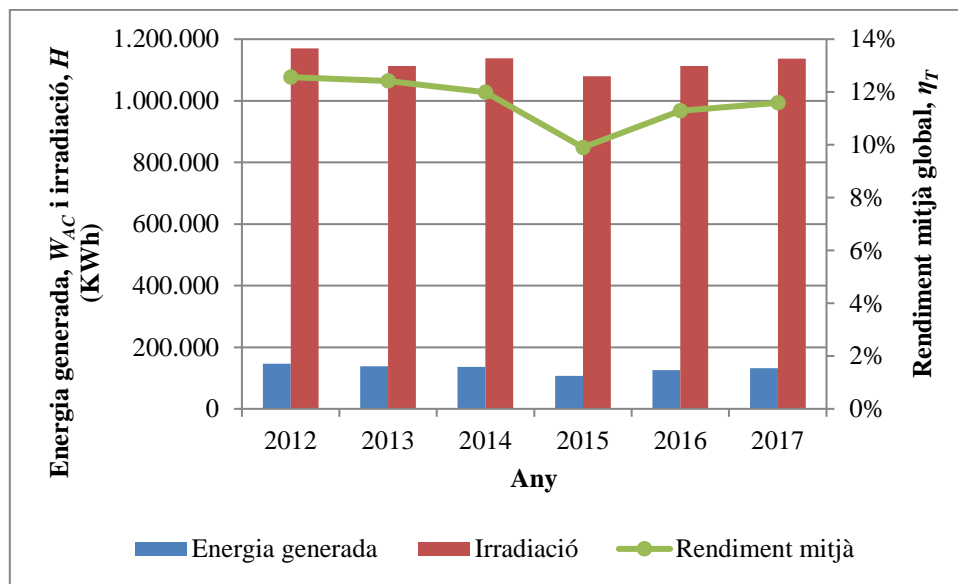
Si analitzem els valors de la Taula 6.7, podem observar que la resistència tèrmica equivalent mostra una tendència bastant constant al llarg dels anys. Els únics dos anys més destacables serien el 2013, per obtenir un valor lleugerament més baix que de mitja, i l'any 2017, per obtenir-ne un de major.

## 7.- Anàlisi dels resultats i discussió.

L'objectiu d'aquest apartat és relacionar la producció fotovoltaica anual amb els resultats obtinguts en aquest treball, amb la finalitat d'intentar justificar el rendiment que ha presentat la instal·lació durant els anys d'estudi.

En la Figura 7.1, es resumeixen els valors anuals de l'energia generada a la sortida de l'inversor, la irradiació rebuda pel camp fotovoltaic i el rendiment mitjà global presentat per la instal·lació.

**Figura 7.1.** Valors anuals d'energia generada, irradiació i rendiment global.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

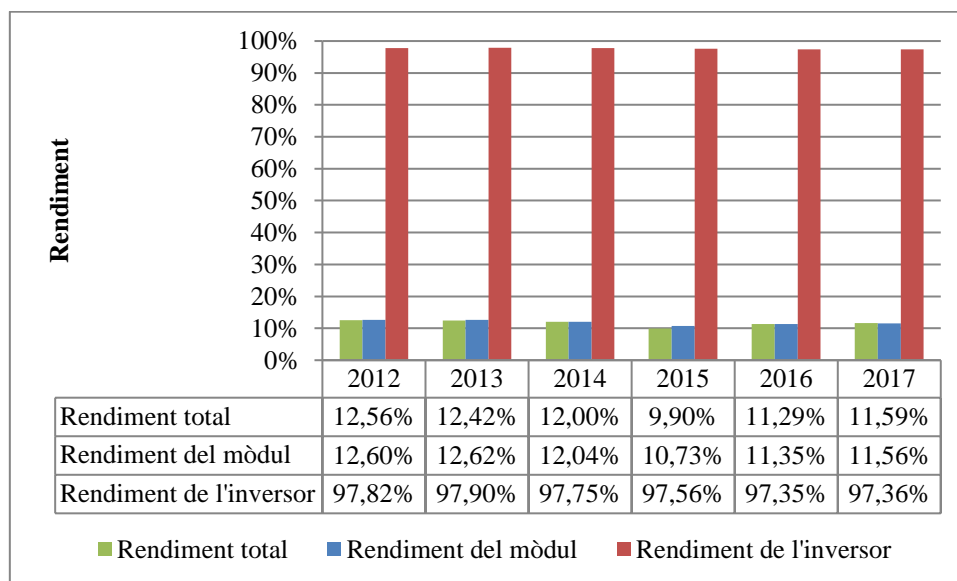
Si analitzem l'evolució anual en la Figura 7.1, podem observar que la irradiació no segueix una trajectòria clara al llarg dels anys, pràcticament oscil·la any rere any. Per altra banda, les tendències de l'energia generada i del rendiment global mantenen un comportament clarament decreixent entre el 2012 i el 2015. I és a partir del 2016, quan aquestes dues variables agafen una trajectòria positiva fins al 2017.

El factor indispensable pel funcionament d'instal·lacions fotovoltaïques és la irradiació solar, tot i això, una irradiació més elevada no assegura una major producció d'energia. Hi ha altres factors que intervenen en el procés de transformació i que accentuaran el rendiment del sistema.

El primer punt que analitzarem serà el rendiment dels components del sistema. En la Figura 7.2 es representen els valors obtinguts del rendiment mitjà del mòdul, de

l'inversor i el global de la instal·lació. Els valors representats de l'eficiència dels dispositius són els provinents de l'apartat de resultats del treball, en canvi, els del rendiment total del sistema estan basats en valors d'energia anual. Aquesta diferència de procedències, ha generat una petita incongruència en l'any 2017, on el valor del rendiment total és lleugerament superior al del mòdul fotovoltaic, i això en condicions normals no tindria sentit físic.

**Figura 7.2.** Valors anuals del rendiment global i dels components de la instal·lació.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

El primer aspecte que cal destacar quan veiem la Figura 7.2 és que el coll d'ampolla en el rendiment de la instal·lació és l'eficiència del mòdul fotovoltaic. El rendiment de la instal·lació es veurà principalment agreujat pel rendiment dels panells, sempre i quan la planta operi en condicions normals.

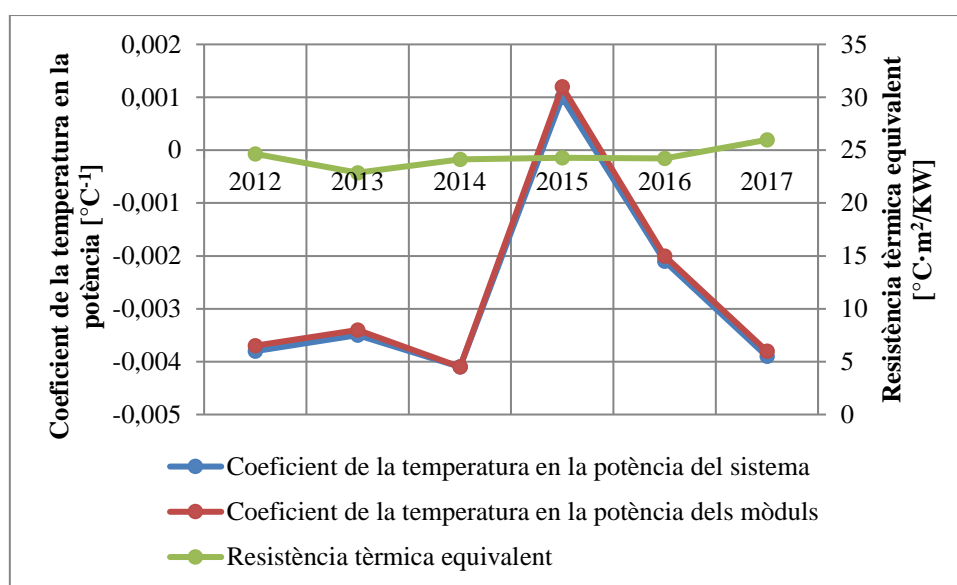
L'inversor d'ona presenta un rendiment mitjà molt constant al llarg dels anys; establint una eficiència sempre superior al 97%. Segons la fitxa tècnica del dispositiu, el rendiment màxim és del 98,4%. Així doncs, podem dir que el seu funcionament ha estat òptim i les pèrdues que ha originat són mínimes.

En canvi, el rendiment del mòdul no ha experimentat la mateixa constància que l'inversor. Entre els anys 2012 i 2013 es presenta la màxima eficiència dels mòduls, obtenint un rendiment del 12,6%. A partir del 2014, la tendència és negativa i va minvant fins arribar al seu mínim de 10,73% l'any 2015. Després, el seu comportament canvia i agafa una tendència creixent fins al 2017, aportant una eficiència final del 11,56%.

D'acord amb la fitxa tècnica del panell, l'eficiència màxima és del 14,12%. No obstant, els rendiments calculats han mostrat resultats més baixos al llarg dels anys, arribant fins a una variació relativa respecte el valor nominal del 24%. Hi ha diversos factors que intervenen en l'eficiència del mòdul, però el més significant n'és la seva temperatura.

El següent punt a analitzar és la influència de la temperatura en el nostre sistema. En la Figura 7.3 es representen els valors dels coeficients de la temperatura en la potència i la resistència tèrmica equivalent del nostre sistema. Aquestes dades aportaran informació complementària que podrem relacionar amb els rendiments de la instal·lació.

**Figura 7.3.** *Influència de la temperatura en la producció fotovoltaica.*



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

Si analitzem les sèries de valors dels coeficients de la temperatura en la Figura 3, es pot observar que el coeficient del sistema i el del mòduls tenen comportaments pràcticament iguals. El coeficient de la temperatura en la potència ens informa sobre en quina quantitat varia la potència generada per cada increment en la temperatura del mòdul. Si la potència de referència és la de la sortida de l'inversor, parlarem del coeficient de temperatura del sistema, en canvi, si considerem la potència a la sortida del *string* fotovoltaic, estariem descrivint el coeficient de la temperatura en els mòduls.

La gran similitud que es presenta entre ambdós coeficients ens informa que la potència a la sortida l'inversor no es veurà afectada per la temperatura dels mòduls. En canvi, si que influirà en el funcionament dels mòduls. Per tant, mostrarem especial interès en l'estudi del coeficient de temperatura en la potència dels panells.

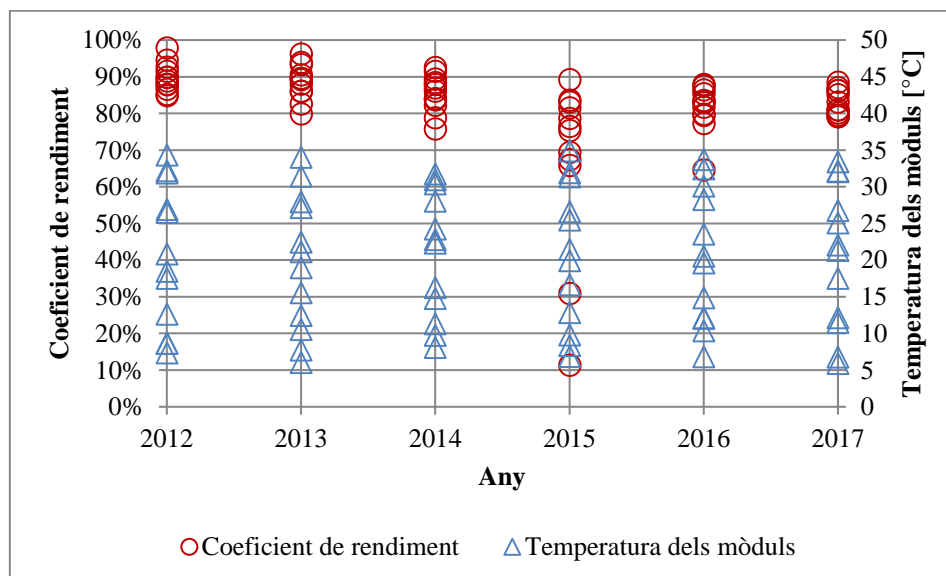


El coeficient de la temperatura en la potència dels mòduls té un comportament bastant constant entre el 2012 i el 2014. En canvi, a partir de llavors la seva tendència canvia totalment, resultant uns valors fora dels habituals, propiciant fins i tot un valor positiu, la qual cosa no té massa sentit. Finalment, al 2017 el coeficient torna a assolir uns valors molt similars als del inici. El coeficient de la temperatura en la potència teòric, facilitat pel fabricant del mòduls, té un valor de  $-0,43\%/^{\circ}\text{C}$ . En absència dels anys 2015 i 2016, els valors resultants de la regressió han obtingut valors molt pròxims.

El canvi notable en els valors del coeficient durant els anys 2015 i 2016 ens indica que la instal·lació ha sofert algun tipus d'alteració en el seu funcionament normal. Aquest fet concorda amb el baix rendiment dels mòduls registrat durant aquests anys (Figura 7.2). En una primera instància, podríem pensar que aquesta concordança es podria deure a unes temperatures anormals en el mòdul, però si analitzem la resistència tèrmica veurem que no és així.

Els valors de la resistència tèrmica representats en la Figura 7.3 mostren una certa constància en tots els anys; obtenint uns valors que oscil·len al voltant dels  $24^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{KW}$ . Si durant els anys 2015 i 2016 s'haguessin presentats temperatures anormals, aquest fet s'hagués percebut també en la resistència tèrmica, ja que aquesta guarda proporcionalitat amb la temperatura ambient i la del mòdul. No obstant, la resistència tèrmica en aquests anys no ha diferit de la resta. Per tant, la temperatura no ha sigut el factor desencadenant del baix rendiment de la instal·lació durant aquest període.

**Figura 7.4.** Valors mensuals del coeficient de rendiment i temperatura dels mòduls.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

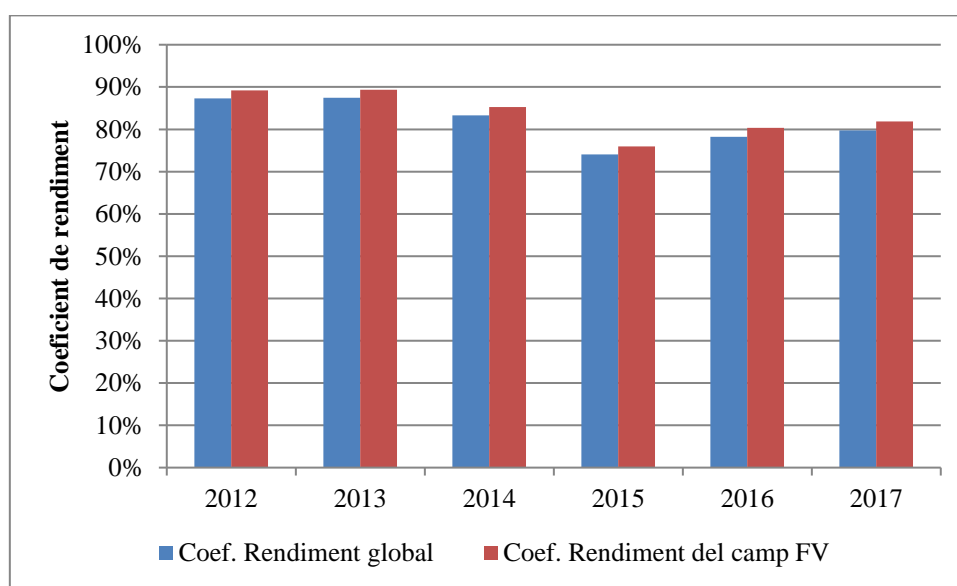
Una altra manera de comprovar que la temperatura no ha estat la responsable del baix rendiment de la instal·lació, durant els anys 2015 i 2016, és a partir de la Figura 7.4. En

aquest gràfic representem els valors mitjans del coeficient de rendiment i de la temperatura dels mòduls en els anys d'estudi.

Si analitzem detalladament la Figura 7.4, podem observar que els valors del coeficient de rendiment en els anys 2015 i 2016 mostren valors puntuals on la instal·lació té un rendiment totalment deficient i, en general, la cohesió dels valors no és tant elevada com en la resta d'anys. D'altra banda, la temperatura dels mòduls mostra una certa constància, presentant valors que oscil·len entre 5°C i 35°C en tots els anys. Així doncs, el baix rendiment de la instal·lació durant el 2015 i el 2016 provingui d'alguna averia prolongada o bé d'algun error pels equips de monitorització.

A més de les pèrdues originades pels components del sistema i la influència de la temperatura en la potència, es presenten altres pèrdues en el sistema, com per exemple, caigudes de voltatge pel cablejat. En la Figura 7.5, representem els valors calculats del coeficient de rendiment global i del camp fotovoltaic.

**Figura 7.5.** Valors anuals del coeficient de rendiment global i del camp fotovoltaic.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

Les tendències del coeficient de rendiment de la instal·lació i del camp fotovoltaic segueixen les mateixes trajectòries al llarg de tots els anys. De fet, si calculem la diferència entre ells, aquesta es manté bastant constant i té un valor que oscil·la el 2%. Per tant, en la nostra instal·lació l'efectivitat cauria en tant sols un 2% a causa de les pèrdues entre la sortida del mòdul fins a la xarxa de distribució elèctrica.

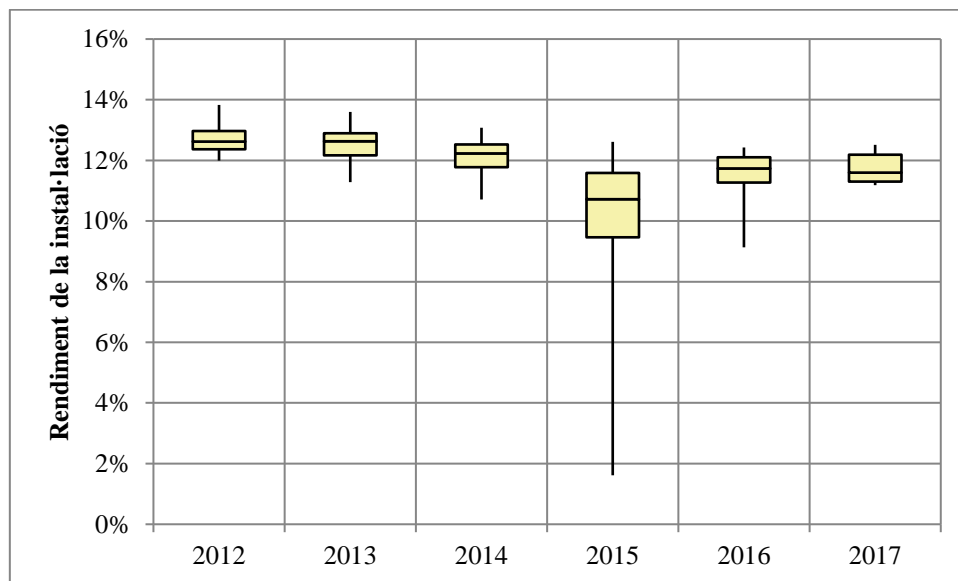
Així doncs, per finalitzar l'apartat es presenta la Figura 6, la qual és una representació gràfica dels valors mensuals mitjans del rendiment global del sistema. Si analitzem la

Figura 7.6 podem veure que en el 2012, 2013 i 2014 els valors del rendiment mostren una bona cohesió entre si, mantenint uns nivells d'eficiència correctes durant tots els anys. La dispersió entre el valor màxim i el mínim està condicionada per la temperatura del mòdul, ja que durant els mesos més càlids el rendiment disminueix i, ens els freds, augmenta. La temperatura del mòdul origina que el rendiment del mòdul oscil·li al llarg de l'any en una amplitud d'un 2% aproximadament.

En aquests tres anys, els resultats obtinguts en el treball no mostren cap valor anormal o que difereixi molt dels valors teòrics. Els rendiments dels components, els coeficients de la temperatura i la resistència tèrmica no exposen canvis sobtats al llarg d'aquest període. Malgrat això, la tendència del rendiment global és lleugerament decreixent. Aquest fet es podria deure a que les cèl·lules solars poden sofrir una degradació fotònica, a causa de l'exposició a la llum durant els primers mesos de funcionament, que pot fer decreixer el valor de la potència màxima del mòdul fins a un 3%.

Aquest tipus de tecnologia també sol disposar d'un valor teòric que ens informa sobre quin percentatge de degradació tindrà anualment, degut a l'envelliment de l'aparell. En la fitxa tècnica del mòdul no s'especifica cap nivell de degradació anual, però, tot i que no aparegui, és habitual que el rendiment dels mòduls vagi disminuint al llarg dels anys.

**Figura 7.6.** Diagrama de caixa i bigotis del rendiment global anual de la instal·lació.



Font: Universitat de Lleida. Elaboració pròpia.

El rendiments durant el 2015 i el 2016 són els més inferiors de tots, tal i com ja havíem comentat anteriorment en aquest apartat, aquest comportament s'ha generat a causa d'alguna incidència en el funcionament dels mòduls, propiciat per alguna averia o bé per un error en la monitorització del sistema. Finalment, en el 2017 els valors dels coeficients calculats tornen a agafar el ritme dels primers anys, i el rendiment de la instal·lació augmenta.

## 8.- Conclusions.

Un cop finalitzat aquest Treball de Final de Grau, podem extreure diverses conclusions sobre els resultats obtinguts i la metodologia emprada.

En referència a la metodologia, l'ús de valors instantanis pels càlculs, enlloc de valors mitjans, ha propiciat, en general, resultats que s'han ajustat amb un alt grau amb els teòrics donats pel fabricant.

D'altra banda, l'aplicació dels dies representatius ens ha permès, tant sols emprant un rang de dades raonable, estudiar el comportament mitjà de la instal·lació durant un període de sis anys i, fins i tot, la detecció d'incongruències en el seu funcionament. No obstant, malgrat els bons resultats aconseguits en el treball, aquesta pràctica només considera les alteracions del sistema que han estat lo suficientment significatives i prolongades.

L'ús dels coeficients de rendiment, els coeficients de la temperatura en la potència i la resistència tèrmica ens ha permès justificar la producció fotovoltaica anual, mostrant una gran concordança entre els valors mitjans i els anuals. Aquesta metodologia ha permès estudiar tot el procés de transformació d'energia en el sistema propiciant resultats satisfactoris.

## 9.- Bibliografía.

- [1] Markvart, T., Castañer, L., 2003: *Practical Handbook of Photovoltaics. Fundamentals and Applications*. Elsevier.
- [2] Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese A., 2007: *Renewable Energy. Technology, Economics and Environment*. Springer.
- [3] Goetzberger, A., Hoffmann V.U., 2005: *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Springer.
- [4] D. Yogi Goswami, 2015: *Principles of solar engineering*. Third edition. CRC Press.
- [5] Blaesser, D., Munro, D. 1995: *Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants. Document B. Analysis and Presentation of Monitoring Data*, Report EUR 16339 EN, Institute for Systems Engineering and Informatics, Joint Research Centre.
- [6] International Standard IEC 61724:1998: *Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis*. International Electrotechnical Commission.
- [7] Report IEA-PVPS T12-07:2017: *Improving Efficiency of PV Systems Using Statistical Performance Monitoring*. International Energy Agency. Photovoltaic Power Systems Programme.
- [8] Report IEA-PVPS T13-03:2014: *Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems. Good practises for Monitoring and Performance Analysis*. International Energy Agency. Photovoltaic Power Systems Programme.
- [9] Copper, J., Bruce. A., Spooner, T., Calais, M., Pryor, T., Watt, M., 2013: *Australian Technical Guidelines for Monitoring and Analysing Photovoltaic Systems*. Version 1. Australian PV Institute.
- [10] Woyte, A., Richter, M., Moser, D., Mau, S., Reich, N., Jahn, U., 2013: *Monitoring of photovoltaic systems: Good practices and systematic analysis*. European PV Solar Energy Conference and Exhibition.

## Annex

En l'annex del treball s'inclou:

- Fitxa tècnica del mòdul fotovoltaic (Atersa A-230P)
- Fitxa tècnica de l'inversor (SMA STP 15.000 TL-10)

# A-214P, A-222P, A-230P

## Laminado Fotovoltaico

### FUNCIONALIDAD ECOLÓGICA

ATERSA utiliza materiales de última generación para fabricar sus laminados fotovoltaicos. Los materiales utilizados en los laminados de 60 células policristalinas permiten la construcción de este tipo de laminados de alta potencia, lo que simplifica la instalación de los sistemas de conexión a red y sistemas de bombeo de agua directo. Estos laminados se agrupan en la gama de alta potencia, y son ideales para cualquier aplicación que utilice el efecto fotoeléctrico como fuente de energía limpia, debido a su mínima polución química y nula contaminación acústica.

### MATERIALES

El largo bagaje de ATERSA en la fabricación de módulos fotovoltaicos, sitúa a la empresa en una posición inmejorable a la hora de elegir los materiales más adecuados para su producción, lo que significa garantía de calidad para sus productos.

Cada laminado está formado por un cristal con alto nivel de transmisividad. Cuenta con uno de los mejores encapsulantes utilizados en la fabricación de los módulos, el etil-vinilo-acetato modificado (EVA). La lámina posterior consta de varias capas, cada una con una función específica, ya sea adhesión, aislamiento eléctrico, o aislamiento frente a las inclemencias meteorológicas.

La utilización de los cables con conectores rápidos de última generación, facilita la instalación del módulo sea cual sea su destino.

### CALIDAD

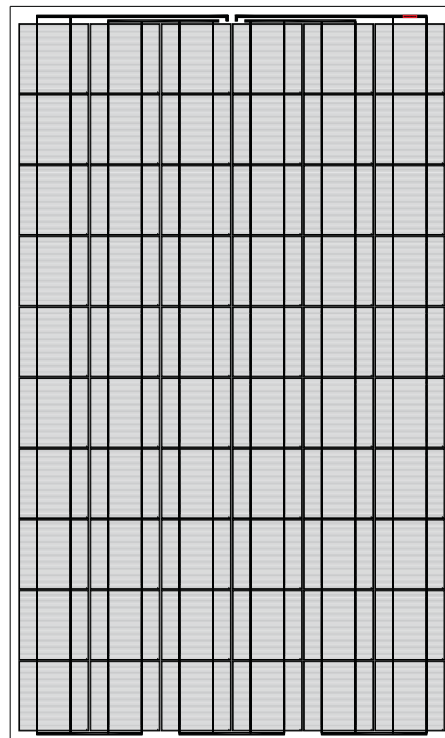
Todos los productos de ATERSA se fabrican bajo las estrictas normas de calidad dictadas por la ISO 9001, certificado que posee la compañía desde el año 1997. Esta serie de laminados cumple con las directivas europeas 2006/95/EC, con la IEC 61215 e IEC 61730 a 1000V<sub>DC</sub>. Entre otras pruebas, los laminados han sido sometidos a 200 ciclos frío-calor de -40°C a +85°C, ensayos de carga mecánica, así como pruebas de resistencia al granizo consistentes en el impacto de una bola de 25,4mm de diámetro a una velocidad de 82 Km/h, once veces sobre el módulo.

La caja de conexiones QUAD 2 dispone de un grado de estanqueidad IP 54, que provee al sistema de un buen aislamiento frente a la humedad e inclemencias meteorológicas. La caja es capaz de albergar cables de conexión con un diámetro exterior desde 4,5mm hasta 10mm.

Estos laminados van provistos de cables simétricos en longitud, con un diámetro de sección de cobre de 4mm<sup>2</sup>, y con una bajísima resistencia de contacto, todo ello destinado a conseguir las mínimas pérdidas por caídas de tensión. Cumplen con todos los requerimientos de seguridad, tanto de flexibilidad, como de doble aislamiento, o alta resistencia a los rayos UV. Todo esto los convierte en cables idóneos para su uso en aplicaciones de intemperie.

### GARANTÍA

GARANTÍA de hasta 25 años sobre la potencia de salida y de 3 años contra los defectos de fabricación. (Para una información más exhaustiva de los términos de la garantía, pueden consultar nuestra página web: [www.atersa.com](http://www.atersa.com)).



## CARACTERÍSTICAS

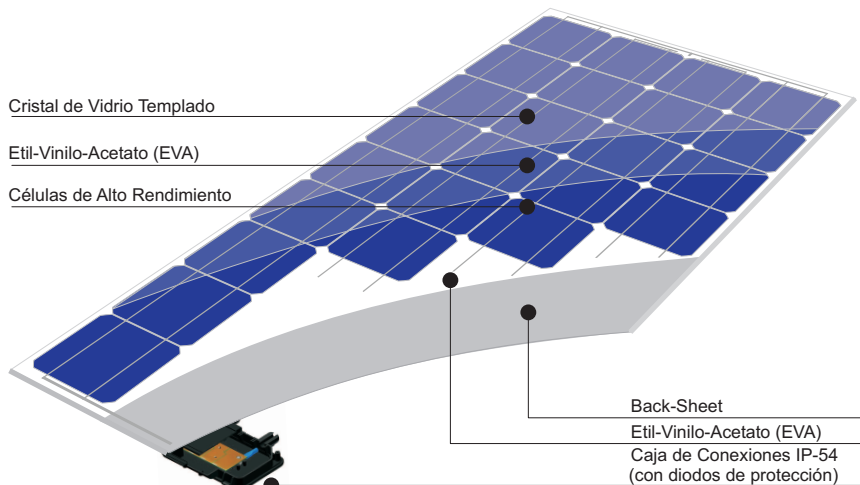
Los datos eléctricos reflejan los valores típicos de los laminados A-214P, A-222P y A-230P medidos en la salida de los terminales, al final del proceso de fabricación.

Mediciones realizadas conforme a ASTM E1036 corregidas a las condiciones de prueba estándar (STC): radiación  $1\text{KW/m}^2$ , distribución espectral AM (masa de aire) 1,5 ASTM E892 y temperatura de célula de  $25^\circ\text{C}$ .

La potencia de las células solares es variable en la salida del proceso de producción. Las diferentes especificaciones de potencia de estos módulos reflejan esta dispersión.

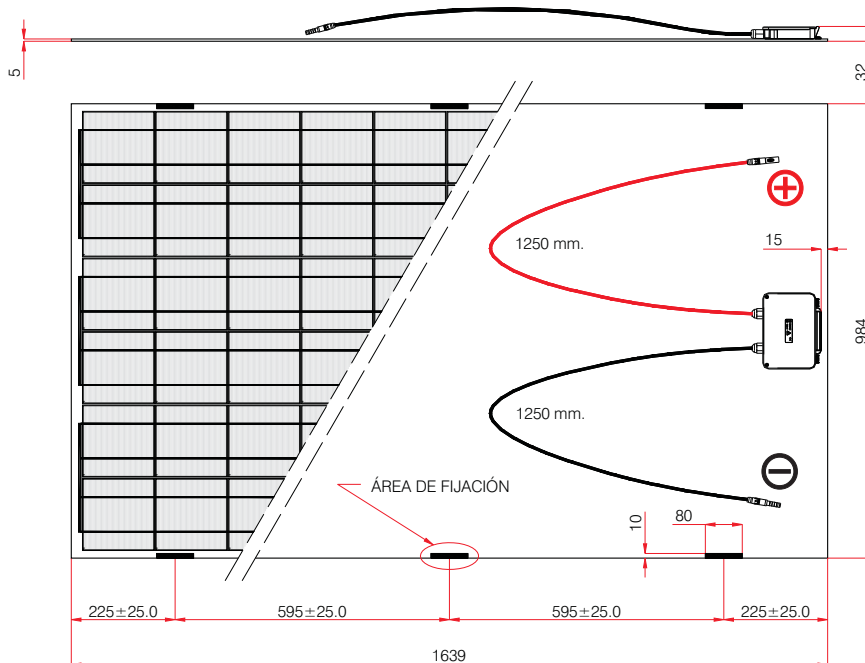
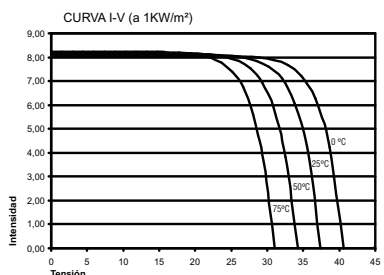
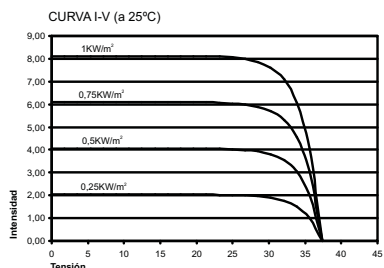
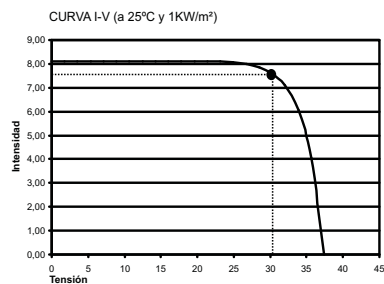
Las células cristalinas, durante los primeros meses de exposición a la luz, pueden experimentar una degradación fotónica que podría hacer decrecer el valor de la potencia máxima del módulo hasta un 3%.

Las células, en condiciones normales de operación, alcanzan una temperatura superior a las condiciones estándar de medida del laboratorio. El TONC es una medida cuantitativa de ese incremento. La medición del TONC se realiza en las siguientes condiciones: radiación de  $0,8\text{KW/m}^2$ , temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$  y velocidad del viento de  $1\text{ m/s}$ .



CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	A-214P	A-222P	A-230P
Potencia (W en prueba $\pm 2\%$ )	214W	222W	230W
Número de células en serie		60	
Eficiencia del módulo	12,64%	13,63%	14,10%
Corriente Punto de Máxima Potencia (Imp)	7,08A	7,44A	7,62A
Tensión Punto de Máxima Potencia (Vmp)	29,10 V	29,84 V	30,20 V
Corriente en Cortocircuito (Isc)	7,65 A	7,96 A	8,12 A
Tensión de Circuito Abierto (Voc)	37,00 V	37,20 V	37,40 V
Coefficiente de Temperatura de Isc ( $\alpha$ )		0.05% /°C	
Coefficiente de Temperatura de Voc ( $\beta$ )		-0,35% /°C	
Coefficiente de Temperatura de P ( $\gamma$ )		-0,46% /°C	
Máxima Tensión del Sistema		1000 V	
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS			
Dimensiones (mm.)	1639X984X5 (profundidad con caja de conexión 32 mm.)		
Peso (aprox.)	19 Kg		
Especificaciones eléctricas medidas en STC. TONC: 47±2°C			
NOTA: Los datos contenidos en esta documentación están sujetos a modificación sin previo aviso.			

### CURVAS MODELO A-230P



VISTA FRONTAL

VISTA POSTERIOR

MADRID 28045  
C/ Embajadores, 187-3º  
tel. +34 915 178 580  
tel. +34 915 178 452  
fax. +34 914 747 467

ALMUSSAFES (VALENCIA)  
46440 P.I. Juan Carlos I  
Avda. de la Foia, 14  
tel. 902 545 111  
fax. 902 503 355  
e-mail: atersa@atersa.com

20041 AGRATE BRIANZA  
(MILAN) - ITALIA  
Centro Direzionale Colleoni  
Palazzo Liocorno - Ingresso 1  
Via Paracelso n. 2  
tel. +39 039 2262482



STP 15000TL-10



**NEW** – With Cutting-Edge  
Grid Management Functions

## Efficient

- Maximum efficiency of 98.2 %
- SMA OptiTrac Global Peak MPP tracking for best MPP tracking efficiency

## Reliable

- Triple protection with Optiprotect—electronic string fuse, self-learning string failure detection, integrable DC surge arrester (SPD Type II)

## Flexible

- DC input voltage of up to 1000 V
- Tailor-made system design with Optiflex

## Innovative

- Cutting-edge grid management functions
- Reactive power available 24/7 (Q on Demand)\*

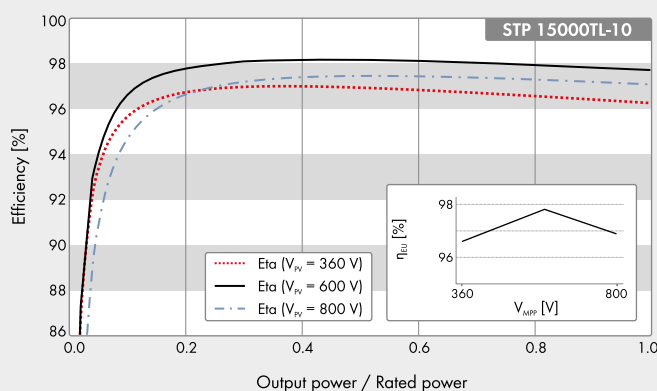
## SUNNY TRIPOWER 15000TL

### The Three-Phase Inverter for Easy PV System Design

The Sunny Tripower 15000TL has new, cutting-edge features: The integration of grid management functions, including Integrated Plant Control, allows the inverter to regulate reactive power at the grid-connection point. This means that upstream regulator units are no longer needed, and system costs are lowered. Another innovation is around-the-clock provision of reactive power (Q on Demand 24/7).

Optiflex technology and the Optiprotect safety concept remain proven standards: Optiflex provides enormous design flexibility with the two MPP inputs in connection with a broad input voltage range - and does it for almost all module configurations. The Optiprotect safety concept, with its self-learning string failure detection, electronic string fuse and integrable DC surge arrester type II, ensures maximum reliability.

## Efficiency Curve



## Accessory



RS485 interface  
DM-485CB-10



SMA Power Control Module  
PWCMOD-10



DC surge arrester (Type II),  
inputs A and B  
DC\_SPD\_KIT\_2-10



Speedwire/Webconnect  
interface SWDM-10



Multifunction relay  
MFR01-10

● Standard features ○ Optional features—Not available  
Data at nominal conditions  
Status: January 2016

## Technical Data

### Input (DC)

Max. DC power (at  $\cos \varphi = 1$ ) / DC rated power  
Max. input voltage  
MPP Voltage range / rated input voltage  
Min. input voltage / initial input voltage  
Max. input current input A / input B  
Max. input current per string input A1 / input B1  
Max. DC short-circuit current input A / input B  
Number of independent MPP inputs/strings per MPP input

### Output (AC)

Rated power (at 230 V, 50 Hz)  
Max. AC apparent power  
Nominal AC voltage  
AC voltage range  
AC power frequency / range  
Rated power frequency/rated grid voltage  
Max. output current / Rated output current  
Power factor at rated power / Adjustable displacement power factor  
THD  
Feed-in phases/connection phases

### Efficiency

Max. efficiency / European efficiency

### Protective devices

Input-side disconnection point  
Ground fault monitoring / grid monitoring  
DC surge arrester SPD type III / SPD type II  
DC reverse polarity protection / AC short-circuit current capability / galvanically isolated  
All-pole sensitive residual-current monitoring unit / Electronic string current monitoring  
Protection class (as per IEC 62109-1) / overvoltage category (as per IEC 62109-1)

### General Data

Dimensions (W / H / D)  
Weight  
Operating temperature range  
Noise emission, typical  
Self-consumption (at night)  
Topology / cooling concept  
Degree of protection (as per IEC 60529)  
Climatic category (according to IEC 60721-3-4)  
Max. permissible value for relative humidity (non-condensing)

### Features / function

DC connection / AC connection  
Display  
Interface: RS485, Bluetooth®, Speedwire / Webconnect  
Data interface: SMA Modbus / SunSpec Modbus  
Multifunction relay / Power Control Module  
OptiTrack Global Peak/Integrated Plant Control/Q on Demand 24/7  
Off-Grid capable/SMA Fuel Save Controller compatible  
Warranty: 5/10/15/20/25 years  
Certificates and approvals (others available upon request)

<sup>1</sup> To be observed in the event of short-circuit of the string fuse.  
<sup>2</sup> Does not apply to all national appendices of EN 50438

Type designation

## Sunny Tripower 15000TL

15340 W / 15340 W  
1000 V  
360 V to 800 V / 600 V  
150 V / 188 V  
33 A / 11 A  
40 A / 12.5 A  
50 A / 17 A  
2 / A;5; B:1

15000 W  
15000 VA  
3 / N / PE; 220 / 380 V  
3 / N / PE; 230 / 400 V  
3 / N / PE; 240 / 415 V  
160 V to 280 V  
50 Hz / 44 Hz to 55 Hz  
60 Hz / 54 Hz to 65 Hz  
50 Hz / 230 V  
24 A / 24 A  
1 / 0 lagging to 0 leading  
 $\leq 3\%$   
3 / 3

98.2% / 97.8%

●  
● / ●  
● / ○  
● / ● / —  
● / ●  
I / AC: III; DC: II

665 / 690 / 265 mm (26.2 / 27.2 / 10.4 inches)  
59 kg (130.07 lb)  
−25 °C to +60 °C (−13 °F to +140 °F)  
51 dB(A)  
1 W  
Transformerless / OptiCool  
IP65  
4K4H  
100%

SUNCLIX / spring-cage terminal

Graphic  
○ / ● / ○  
○ / ○  
○ / ○  
● / ● / ●  
● / ●  
● / ○ / ○ / ○ / ○

AS 4777, BDEW 2008, C10/11:2012, CE, CEI 0-16, CEI 0-21, EN 50438<sup>2</sup>, G59/3, IEC 60068-2, IEC 61727, MEA 2013, IEC 62109-1/2, NEN EN 50438, PPC, PPDS, RD 1699, RD 661/2007, SI4777, UTE C15-712-1, VDE 0126-1-1, VDE-AR-N 4105, VFR 2013, VFR 2014

STP 15000TL-10